

**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) № 4 2024



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 № 1 від 30.08.2024 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

ISSN 2663-5941 (Print)

ISSN 2663-595X (Online)

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

ЗМІСТ

МАШИНОЗНАВСТВО

Поліщук М.М., Ролік О.І.

ДРОН ДЛЯ ТЕХНІЧНОГО ОБСЛУГОВУВАННЯ

ТРУБ ВЕЛИКОГО ДІАМЕТРУ.....1

ОБРОБКА МАТЕРІАЛІВ У МАШИНОБУДУВАННІ

Казмиренко Ю.О., Лебедева Н.Ю., Довженко Д.В., Риженко М.С., Баюнов А.О.

ФОРМУВАННЯ КАРКАСНОЇ СТРУКТУРИ ПРЕСОВОК З ПОРОШКУ ТА СТРУЖКИ МІДІ.....8

ГАЛУЗЕВЕ МАШИНОБУДУВАННЯ

Гапонова О.П., Тарельник Н.В.

ДОСЛІДЖЕННЯ СТРУКТУРИ І ТРИБОЛОГІЧНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ MoS₂ -ПОКРИТТІВ,

ОТРИМАНИХ МЕТОДОМ ЕЛЕКТРОІСКРОВОГО ЛЕГУВАННЯ..... 13

ПРИЛАДИ

Романюк В.А., Стародубцев С.О.

ОЦІНКА ВПЛИВУ ТЕПЛОФІЗИЧНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ МАТЕРІАЛУ ОБШИВКИ

БЕЗПЛОТНИХ ЛІТАЛЬНИХ АПАРАТІВ НА ЕФЕКТИВНІСТЬ ЛАЗЕРНИХ ЗАСОБІВ УРАЖЕННЯ... 22

РАДІОТЕХНІКА ТА ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЇ

Кононова І.В., Некрутенко В.І.

МОДЕЛЬ ШЛЯХУ ІНФОРМАЦІЙНОГО НАПРЯМКУ МЕРЕЖІ ЗВ'ЯЗКУ

СПЕЦІАЛЬНОГО ПРИЗНАЧЕННЯ З РЕАЛЬНОЮ НАДІЙНІСТЮ ОБЛАДНАННЯ..... 27

Корчинський В.М.

ОПТИМІЗАЦІЯ ПРОПУСКНОЇ ЗДАТНОСТІ ІНФОРМАЦІЙНИХ КАНАЛІВ ПЕРЕДАЧІ

РАСТРОВИХ ЗОБРАЖЕНЬ.....33

Manko O.O., Kharlai L.O., Kononov O.Yu., Nikiforenko K.B., Sotnichenko Yu.O., Vakas V.I.

INCREASING THE EFFICIENCY OF OPTICAL CRYPTOGRAPHY USING PASSIVE

OPTICAL ELEMENTS..... 38

ІНФОРМАТИКА, ОБЧИСЛЮВАЛЬНА ТЕХНІКА ТА АВТОМАТИЗАЦІЯ

Behlov Ya.I., Tarakhtii O.S.

COMPARISON OF EXTREME PYROLYSIS PLANT CONTROL SYSTEMS..... 45

Богза М.С., Волощук В.А.

ЗАСТОСУВАННЯ МЕТОДІВ МАШИННОГО НАВЧАННЯ У ЗАДАЧАХ МОДЕЛЮВАННЯ

ДИНАМІКИ ТЕПЛОНАСОСНИХ УСТАНОВОК.....52

Василенко В.М., Вакалюк Т.А.

ШТУЧНИЙ ІНТЕЛЕКТ В УПРАВЛІННІ ПРОЄКТАМИ: АНАЛІЗ СУЧАСНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ

ТА ПЕРСПЕКТИВ РОЗВИТКУ.....60

Вдовичин Т.Я., Білий Р.Т.

ЦИФРОВИЙ ІНСТРУМЕНТ GOOGLE SITES ДЛЯ СТВОРЕННЯ Е-ПОРТФОЛІО..... 68

Дроменко В.Б., Лісовець С.М.

ОСОБЛИВОСТІ ІНЖЕНЕРІЇ ПРОГРАМНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ПРИ РОЗРОБЛЕННІ СИСТЕМ

З ЕЛЕМЕНТАМИ ШТУЧНОГО ІНТЕЛЕКТУ..... 74

Заболотний О.В., Сіроклин В.П., Нікулін С.С.

РОЗРОБКА АПАРАТНО-ПРОГРАМНОГО КОМПЛЕКСУ ДЛЯ ТЕСТУВАННЯ БОЙОВИХ

КВАДРОКОПТЕРІВ: ПІДВИЩЕННЯ НАДІЙНОСТІ І ЕФЕКТИВНОСТІ

У СУЧАСНІЙ ВІЙСЬКОВІЙ ТЕХНОЛОГІЇ..... 83

| | |
|---|-----|
| Зилевіч М.О., Заїченко В.Д. РОЗРОБКА ВИМІРЮВАЛЬНОГО КОМПЛЕКСУ СТАНУ АТМОСФЕРНОГО ПОВІТРЯ..... | 91 |
| Карпенко М.І., Чумаченко С.М., Мошенський А.О., Гуйда О.Г. ВИБІР ОПТИМАЛЬНОЇ БАЗИ ДАНИХ ДЛЯ СТВОРЕННЯ ПРОГРАМНО-АПАРАТНОГО КОМПЛЕКСУ ВИЯВЛЕННЯ НЕБЕЗПЕЧНИХ РЕЧОВИН..... | 98 |
| Кириченко О.Л., Кириченко О.О. ВИКОРИСТАННЯ AWS APPSYNC ДЛЯ КОМУНІКАЦІЇ ВЕБДОДАТКІВ У РЕАЛЬНОМУ ЧАСІ..... | 105 |
| Кисіль А.Ю. МЕТОДОЛОГІЯ ВПРОВАДЖЕННЯ СИСТЕМ МАШИННОГО АНАЛІЗУ ГРАФІЧНИХ ДАНИХ ПРИ ВИКОНАННІ ВІЙСЬКОВИХ ЗАВДАНЬ..... | 111 |
| Кримська А.О. КЛЮЧОВА РОЛЬ ПОЛІГРАФОЛОГІЧНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ У СТРАТЕГІЯХ УПРАВЛІННЯ ІНФОРМАЦІЙНОЮ БЕЗПЕКОЮ В ЕКОНОМІЧНИХ ГАЛУЗЯХ..... | 118 |
| Левківський В.Л., Марчук Д.К., Панаріна І.В., Кузьменко О.В. МОДЕЛЮВАННЯ ТА ПРОГРАМНА РЕАЛІЗАЦІЯ ПІДСИСТЕМИ МОНІТОРИНГУ СТАНУ ЗДОРОВ'Я..... | 123 |
| Легеза В.П., Нещадим О.М. ДВОХФАКТОРНИЙ КРИТЕРІЙ ОПТИМІЗАЦІЇ І ЙОГО РЕАЛІЗАЦІЯ В ЗАДАЧІ ПРО БРАХІСТОХРОНУ НА ТРАНСЦЕНДЕНТНІЙ ПОВЕРХНІ..... | 128 |
| Лисенко О.І., Тачинина О.М., Фургат С.О., Фургат О.В., Галай О.Ф. МЕТОДИКА АЛГОРИТМІЧНОЇ МОДЕРНІЗАЦІЇ ЦИФРОВИХ ЕЛЕКТРОПРИВОДІВ МЕХАТРОННИХ ПРИСТРОЇВ МАЛОЇ ЦИВІЛЬНОЇ АВІАЦІЇ..... | 135 |
| Oleshchenko L.M., Burchak P.V. SOFTWARE SYSTEM ARCHITECTURE DEVELOPMENT FOR INTELLIGENT ANALYSIS OF WEB APPLICATION PERFORMANCE METRICS..... | 141 |
| Павленко В.Д., Ілуца А.С., Гідулян В.І. ПЛАТФОРМА ДЛЯ ХМАРНИХ ОБЧИСЛЕНЬ У НЕЙРОФІЗІОЛОГІЧНИХ ДОСЛІДЖЕННЯХ НА ОСНОВІ ДАНИХ АЙТРЕКІНГУ..... | 151 |
| Пахомова В.М., Старіков Д.І. ПРОЕКТУВАННЯ БАЗИ ДАНИХ МЕДИЧНИХ ПРЕПАРАТІВ, ЩО СКЛАДАЄ ОСНОВУ ІНФОРМАЦІЙНО-ПОШУКОВОЇ СИСТЕМИ..... | 161 |
| Петросян Р.В. АЛГОРИТМ ОБЧИСЛЕННЯ ЧАСТОТИ НАПРУГИ У ТРИФАЗНІЙ ЕЛЕКТРОМЕРЕЖІ НА БАЗІ ЦИФРОВИХ ФІЛЬТРІВ..... | 168 |
| Пундик В.І. РОЗРОБКА ПРОГРАМНИХ СИСТЕМ В КОНТЕКСТІ ХМАРНИХ ТЕХНОЛОГІЙ З ВИКОРИСТАННЯМ МЕТОДОЛОГІЇ DEVOPS ТА ГНУЧКОЇ МОДЕЛІ РОЗРОБКИ..... | 175 |
| Регеда Ю.О., Регеда В.О. КЛЮЧОВІ ПРОБЛЕМИ ВИКОРИСТАННЯ ВЕЛИКИХ ДАНИХ В ІНФОРМАЦІЙНИХ СИСТЕМАХ НА СУЧАСНОМУ ЕТАПІ РОЗВИТКУ..... | 182 |
| Сікора О.В., Пазюк Р.І. ІГРОВІ ТЕХНОЛОГІЇ У ПІДВИЩЕННІ ЯКОСТІ НАВЧАННЯ ІНФОРМАТИКИ..... | 188 |
| Соломчак О.В., Соломчак А.О. ВИМІРЮВАННЯ ВИЩИХ ГАРМОНІК СТРУМІВ І НАПРУГ В ТОЧКАХ СПІЛЬНОГО ПРИЄДНАННЯ РОЗПОДІЛЬНИХ ЕЛЕКТРИЧНИХ МЕРЕЖ..... | 194 |
| Стаценко Д.В., Стаценко В.В., Злотенко Б.М., Демішонкова С.А. ЗАСТОСУВАННЯ МОДЕЛЕЙ МАШИННОГО НАВЧАННЯ ДЛЯ ОПТИМІЗАЦІЇ УПРАВЛІННЯ ІНТЕЛЕКТУАЛЬНИМИ МЕРЕЖАМИ ВІДНОВЛЮВАЛЬНИХ ДЖЕРЕЛ ЕНЕРГІЇ..... | 202 |
| Тарновецька О.Ю., Осадчук Р.Р. ДОСЛІДЖЕННЯ МЕТОДІВ ВЗАЄМОДІЇ МІЖ СЕРВІСАМИ ПРИ МІКРОСЕРВІСНІЙ АРХІТЕКТУРІ ПРОГРАМНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ..... | 208 |
| Khambir V.R. ANALYZING PROJECT MANAGEMENT METHODS IN SOFTWARE DEVELOPMENT..... | 218 |

| | |
|---|-----|
| Шкарупило В.В., Душеба В.В., Зайко Т.А., Шкарупило В.В., Скрупський С.Ю. ІНДУКТИВНИЙ ПІДХІД ДО ПОБУДОВИ ФОРМАЛІЗОВАНИХ ПОДАНЬ ПРОГРАМНО- АЛГОРИТМІЧНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ПРИ ПРОЄКТУВАННІ..... | 224 |
|---|-----|

ЕНЕРГЕТИКА

| | |
|--|-----|
| Бовсуновський А.П., Носаль О.Ю. ОСОБЛИВОСТІ ВІБРАЦІЙНОЇ ДІАГНОСТИКИ ПОШКОДЖЕННЯ ЛОПАТОК ТУРБІН..... | 230 |
| Бовсуновський О.А., Носаль О.Ю. ДІАГНОСТИКА ПОШКОДЖЕННЯ РОТОРІВ ТУРБІН НА СТАДІЇ РЕМОНТУ..... | 238 |
| Габовда О.В. ДОСЛІДЖЕННЯ КОНЦЕПЦІЇ, ЩО ЛЕЖИТЬ В ОСНОВІ РОБОТИ БЕЗЛОПАТЕВИХ ВІТРОГЕНЕРАТОРІВ..... | 246 |
| Пешко В.А., Коновалюк О.Л. ЗАКОНОМІРНОСТІ ФОРМУВАННЯ ТЕМПЕРАТУРНОГО ПОЛЯ РОТОРА ТУРБІНИ ПІД ЧАС ПУСКОВОГО РЕЖИМУ РОБОТИ..... | 254 |
| Ryndyuk D.V., Bednarska I.S. MODELING OF STEAM GAS DYNAMICS IN MAIN PIPELINES OF NUCLEAR POWER PLANTS.... | 260 |
| Шахбазов І.О., Сірий О.А. МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСУ ГОРІННЯ ВОДНЕВМІСНОГО ПАЛИВА В ПРЯМОТОЧНОМУ ПАЛЬНИКУ КРУГЛОГО ПЕРЕТИНУ..... | 265 |
| Шелешей Т.В., Беднарська І.С., Панченко К.А., Федорук Р.О. АНАЛІЗ СУЧАСНИХ МЕТОДІВ БОРОТЬБИ З ОКСИДАМИ АЗОТУ В ГАЗОВИХ КОТЛАХ | 271 |

ХІМІЧНІ ТЕХНОЛОГІЇ

| | |
|--|-----|
| Кіндзера Д.П., Госовський Р.Р. ЗАСТОСУВАННЯ СЕРЦЕВИНИ СТЕБЕЛ СОНЯШНИКА ДЛЯ ВИРОБНИЦТВА ТЕПЛОІЗОЛЯЦІЙНИХ МАТЕРІАЛІВ..... | 276 |
| Мельник Л.І., Свідерський В.А. ПОЛІМЕРНИЙ КОМПОЗИЦІЙНИЙ МАТЕРІАЛ НА ОСНОВІ ПЕРЛІТУ..... | 281 |
| Фролова Л.А., Мандрика А.Г., Родін Д.О., Нікітін М.О., Фролов О.О. СТРУКТУРНІ ТА МАГНІТНІ ВЛАСТИВОСТІ МОДИФІКОВАНИХ НАНОЧАСТИНОК ФЕРИТУ КОБАЛЬТУ..... | 288 |

ТЕХНОЛОГІЯ ХАРЧОВОЇ ТА ЛЕГКОЇ ПРОМИСЛОВОСТІ

| | |
|---|-----|
| Павлюк С.К., Суха І.В. ЕКОЛОГІЧНІ АСПЕКТИ ТАРИ: ПРОБЛЕМА ПЕТ ТАРИ ТА ЇЇ УТИЛІЗАЦІЯ..... | 292 |
|---|-----|

ТРАНСПОРТ

| | |
|---|-----|
| Биковець Н.П. АНАЛІЗ ТРАНСПОРТНИХ ПОТОКІВ ПО РІЧЦІ ДУНАЙ В УМОВАХ СЬОГОДЕННЯ..... | 297 |
| Бойко С.М., Котов О.Б., Жуков О.А., Коваль А.М., Риков Г.Ю., Лапіна О.С. АКТУАЛЬНІСТЬ ТА ОСОБЛИВОСТІ ВПРОВАДЖЕННЯ ВІДНОВЛЮВАЛЬНИХ ДЖЕРЕЛ ЕЛЕКТРИЧНОЇ ЕНЕРГІЇ В УМОВАХ ЗАЛІЗНИЧНОГО ТРАНСПОРТУ..... | 303 |
| Гурч Л.М., Майструк В.О. СЬОГОДЕННЯ ТА ПЕРСПЕКТИВИ РОЗВИТКУ ТРАНСПОРТНО-ЛОГІСТИЧНОЇ СИСТЕМИ УКРАЇНИ В ПОВОЄННИЙ ПЕРІОД..... | 308 |
| Павловська Л.А., Коробкова О.М., Шпак Н.Г. ФОРМУВАННЯ ІНФРАСТРУКТУРНОГО КАРКАСУ СХЕМ ДОСТАВКИ ДИЗЕЛЬНОГО ПАЛИВА У ФЛЕКСІ-ТАНКАХ В УМОВАХ ВОЄННОГО СТАНУ..... | 314 |
| Турпак С.М., Острогляд О.О., Васильєва Л.О., Харченко Т.В., Третяк В.І. ЕКОНОМІЧНИЙ АНАЛІЗ ДОСТАВКИ ВАПНЯКУ РІЗНИМИ ТИПАМИ ЗАЛІЗНИЧНОГО РУХОМОГО СКЛАДУ | 321 |

| | |
|--|-----|
| Фомін О.В., Прокопенко П.М., Фоміна А.М., Гунько Є.В. ДОСЛІДЖЕННЯ МІЦНОСТІ ВАГОНА МОДЕЛІ 918 ТА МОЖЛИВОСТІ ПЕРЕОБЛАДНАННЯ (З ВПРОВАДЖЕННЯМ КОМПОЗИТИВ) ДЛЯ ПЕРЕВЕЗЕННЯ НАСИПНИХ ВАНТАЖІВ..... | 327 |
| Фомін О.В., Козинка О.С., Фоміна А.М., Лісничий В.С. ЗАСТОСУВАННЯ М'ЯКИХ ПОЛІМЕРНИХ ПОКРИТТІВ ДЛЯ НЕСІВНИХ СКЛАДОВИХ РУХОМОГО СКЛАДУ..... | 332 |

БУДІВНИЦТВО

| | |
|--|-----|
| Арінушкіна Н.С., Грищенко Т.М. ВИКОРИСТАННЯ СПІНЕНИХ БІТУМІВ ПРИ ВИКОНАННІ БУДІВЕЛЬНО-РЕМОНТНИХ РОБІТ НА АВТОМОБІЛЬНИХ ДОРОГАХ..... | 337 |
| Костін Д.Ю., Арінушкіна О.О., Тетера В.С., Сунь Д. ВПЛИВ ГЕНЕЗИСУ ВИХІДНОЇ СИРОВИНИ НА МОРОЗОСТІЙКІСТЬ КРУПНОЗЕРНИСТИХ ЩЕБЕНЕВО-ПІЩАНИХ СУМІШЕЙ, УКРІПЛЕНИХ ЦЕМЕНТОМ..... | 342 |
| Савченко О.В., Ніжник В.В., Савченко Т.О. ПРОГРАМА ТА МЕТОДИКА ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ ВПЛИВУ СИСТЕМ ПРОТИПОЖЕЖНОГО ЗАХИСТУ НА ІНДИВІДУАЛЬНИЙ ПОЖЕЖНИЙ РИЗИК..... | 348 |

ГЕОДЕЗІЯ

| | |
|---|-----|
| Пілічева М.О. ІСНУЮЧІ ПІДХОДИ ДО ЦІНОУТВОРЕННЯ У СФЕРІ ЗЕМЛЕУСТРОЮ..... | 354 |
|---|-----|

ЕЛЕКТРОНІКА

| | |
|--|-----|
| Burkovskiy Ya.Yu., Zinkovsky Yu.F. SIMPLIFIED SHUNT BANDWIDTH CHARACTERIZATION GENERATOR FOR WIDE BANDGAP POWER CONVERTERS..... | 359 |
| Томашевський Р.С., Васильчук Д.П., Залужна Г.В., Семенець Д.А. МЕТОДИКА ВИМІРЮВАННЯ ПАРАМЕТРІВ ЕКВІВАЛЕНТНОЇ ЕЛЕКТРИЧНОЇ СХЕМИ ПЕЗОРЕЗОНАНСНОГО ДАТЧИКА НА ОСНОВІ ВИМІРЮВАННЯ ЧАСТОТ НУЛЬОВОЇ ФАЗИ..... | 366 |
| ВІДОМОСТІ ПРО АВТОРІВ..... | 373 |

CONTENTS

MACHINE SCIENCE

Polishchuk M.M., Rolik O.I.

DRONE FOR MAINTENANCE OF LARGE DIAMETER PIPES.....1

MATERIAL PROCESSING IN MECHANICAL ENGINEERING

Kazymyrenko Yu.O., Lebedieva N.Yu., Dovzhenko D.V., Ryzhenko M.S., Baiunov A.O.

FORMATION OF THE FRAME STRUCTURE OF PRESSES COPPER POWDER AND SHAVINGS...8

INDUSTRIAL ENGINEERING

Gaponova O.P., Tarelnyk N.V.

RESEARCH OF STRUCTURE AND TRIBOLOGICAL PROPERTIES OF MoS₂ COATINGS
OBTAINED BY ELECTRO-SPARK ALLOYING METHOD.....13

EQUIPMENT

Romanyuk V.A., Starodubtsev S.O.

ASSESSMENT OF THE INFLUENCE OF THERMOPHYSICAL PROPERTIES
OF THE COVERING MATERIAL OF UAVS ON THE EFFICIENCY OF LASER DEVICES.....22

RADIO ENGINEERING AND TELECOMMUNICATIONS

Kononova I.V., Nekrutenko V.I.

MODEL OF THE INFORMATION PATH OF A SPECIAL-PURPOSE COMMUNICATION
NETWORK WITH REAL EQUIPMENT RELIABILITY.....27

Korchynskiy V.M.

OPTIMIZATION OF THE BANDWIDTH OF RASTER IMAGE TRANSMISSION CHANNELS.....33

Manko O.O., Kharlai L.O., Konovalov O.Yu., Nikiforenko K.B., Sotnichenko Yu.O., Vakas V.I.

INCREASING THE EFFICIENCY OF OPTICAL CRYPTOGRAPHY USING PASSIVE
OPTICAL ELEMENTS.....38

INFORMATICS, COMPUTER ENGINEERING AND AUTOMATION

Behlov Ya.I., Tarakhtii O.S.

COMPARISON OF EXTREME PYROLYSIS PLANT CONTROL SYSTEMS.....45

Bogza M.S., Voloshchuk V.A.

APPLICATION OF MACHINE LEARNING METHODS
IN THE PROBLEMS OF MODELING THE DYNAMICS OF THERMAL POWER PLANTS.....52

Vasylenko V.M., Vakaliuk T.A.

ARTIFICIAL INTELLIGENCE IN PROJECT MANAGEMENT: ANALYSIS
OF MODERN RESEARCH AND DEVELOPMENT PROSPECTS.....60

Vdovychyn T.Ya., Bilyy R.T.

GOOGLE SITES DIGITAL TOOL FOR E-PORTFOLIO CREATION.....68

Dromenko V.B., Lisovets S.M.

FEATURES OF SOFTWARE ENGINEERING IN THE DEVELOPMENT OF SYSTEMS
WITH ELEMENTS OF ARTIFICIAL INTELLIGENCE.....74

Zabolotnyi O.V., Siroklyn V.P., Nikulin S.S.

DEVELOPMENT OF A HARDWARE-SOFTWARE COMPLEX FOR COMBAT
QUADCOPTERS TESTING: IMPROVING RELIABILITY AND EFFICIENCY
IN MODERN MILITARY TECHNOLOGY.....83

Zylevich M.O., Zaichenko V.D.

DEVELOPMENT OF AN ATMOSPHERIC AIR CONDITION MONITORING SYSTEM.....91

| | |
|---|-----|
| Karpenko M.I., Chumachenko S.M., Moshenskyi A.O., Guida O.G. CHOOSING THE OPTIMAL DATABASE FOR CREATING A SOFTWARE AND HARDWARE COMPLEX FOR THE DETECTION OF DANGEROUS SUBSTANCES..... | 98 |
| Kyrychenko O.L., Kyrychenko O.O. THE UTILIZATION OF AWS APPSYNC FOR REAL-TIME WEB APPLICATION COMMUNICATION ... | 105 |
| Kysil A.Yu. METHODOLOGY FOR IMPLEMENTING MACHINE ANALYSIS SYSTEMS OF GRAPHICAL DATA IN MILITARY OPERATIONS..... | 111 |
| Krymska A.O. THE KEY ROLE OF POLYGRAPH EXAMINATIONS IN INFORMATION SECURITY MANAGEMENT STRATEGIES IN ECONOMIC SECTORS..... | 118 |
| Levkivskiy V.L., Marchuk D.K., Panarina I.V., Kuzmenko A.V. MODELING AND SOFTWARE IMPLEMENTATION OF A HEALTH MONITORING SUBSYSTEM.. | 123 |
| Legeza V.P., Neshchadym O.M. A TWO-FACTOR OPTIMIZATION CRITERION AND ITS IMPLEMENTATION IN THE PROBLEM ABOUT BRACHISTOHRON ON A TRANSCENDENT SURFACE..... | 128 |
| Lysenko O.I., Tachynyna O.M., Furtat S.O., Furtat O.V. METHODOLOGY OF ALGORITHMIC MODERNIZATION OF DIGITAL ELECTRIC DRIVES OF MECHATRONIC DEVICES OF SMALL CIVIL AVIATION..... | 135 |
| Oleshchenko L.M., Burchak P.V. SOFTWARE SYSTEM ARCHITECTURE DEVELOPMENT FOR INTELLIGENT ANALYSIS OF WEB APPLICATION PERFORMANCE METRICS..... | 141 |
| Pavlenko V.D., Ilutsa A.S., Gidulian V.I. A PLATFORM FOR CLOUD COMPUTING IN NEUROPHYSIOLOGICAL RESEARCH BASED ON EYETRACKING DATA..... | 151 |
| Pakhomova V.M., Starikov D.I. DESIGN OF A DATABASE OF MEDICINES, WHICH FORMS THE BASIS OF AN INFORMATION RETRIEVAL SYSTEM..... | 161 |
| Petrosian R.V. ALGORITHM FOR CALCULATING THE VOLTAGE FREQUENCY IN A THREE-PHASE POWER SYSTEM BASED ON DIGITAL FILTERS..... | 168 |
| Pundyk V.I. SOFTWARE SYSTEMS DEVELOPMENT IN THE CONTEXT OF CLOUD TECHNOLOGIES USING THE DEVOPS METHODOLOGY AND AGILE DEVELOPMENT..... | 175 |
| Regeda I.O., Reheda V.O. KEY ISSUES IN THE USE OF BIG DATA IN INFORMATION SYSTEMS AT THE CURRENT STAGE OF DEVELOPMENT..... | 182 |
| Sikora O.V., Pazyuk R.I. GAME TECHNOLOGIES IN INCREASED QUALITY EDUCATION OF COMPUTER SCIENCES... | 188 |
| Solomchak O.V., Solomchak A.O. MEASUREMENT OF HIGHER HARMONICS OF CURRENTS AND VOLTAGE AT POINTS OF COMMON CONNECTION OF DISTRIBUTION ELECTRICAL NETWORKS..... | 194 |
| Statsenko D.V., Statsenko V.V., Zlotenko B.M., Demishonkova S.A. APPLICATION OF MACHINE LEARNING MODELS TO OPTIMIZE MANAGEMENT OF RENEWABLE ENERGY SOURCES INTELLIGENT NETWORKS..... | 202 |
| Tarnovetska O.Yu., Osadchuk R.R. RESEARCH OF INTERACTION METHODS BETWEEN SERVICES IN MICROSERVICE SOFTWARE ARCHITECTURE..... | 208 |
| Khambir V.R. ANALYZING PROJECT MANAGEMENT METHODS IN SOFTWARE DEVELOPMENT..... | 218 |
| Shkarupylo V.V., Dusheba V.V., Zaiko T.A., Shkarupylo V.V., Skrupsky S.Yu. INDUCTIVE APPROACH TO SOFTWARE AND ALGORITHMIC COMPONENT FORMALIZED REPRESENTATIONS CONSTRUCTION AT DESIGN..... | 224 |

POWER ENGINEERING

| | |
|--|-----|
| Bovsunovsky A.P., Nosal O.Yu. FEATURES OF VIBRATION DIAGNOSTICS OF TURBINE BLADES DAMAGE | 230 |
| Bovsunovsky O.A., Nosal O.Yu. DIAGNOSTICS OF TURBINE ROTORS DAMAGE AT THE REPAIR STAGE..... | 238 |
| Habovda O.V. STUDY OF THE CONCEPT UNDERLYING THE OPERATION OF BLADELESS WIND GENERATORS. | 246 |
| Peshko V.A., Konovaliuk O.L. CHARACTERISTIC FEATURES OF THE TEMPERATURE FIELD FORMATION IN THE TURBINE ROTOR DURING THE START-UP MODE OF OPERATION..... | 254 |
| Ryndyuk D.V., Bednarska I.S. MODELING OF STEAM GAS DYNAMICS IN MAIN PIPELINES OF NUCLEAR POWER PLANTS.... | 260 |
| Shakhbazov I.O., Siryi O.A. MATHEMATICAL MODELING OF THE HYDROGEN-CONTAINING FUEL COMBUSTION PROCESS IN A DIRECT FLOW BURNER WITH ROUND SECTION..... | 265 |
| Sheleshei T.V., Bednarska I.S., Panchenko K.A., Fedoruk R.O. ANALYSIS OF MODERN METHODS OF COMBATING NITROGEN OXIDES IN GAS BOILERS... | 271 |

CHEMICAL TECHNOLOGY

| | |
|---|-----|
| Kindzera D.P., Hosovskyi R.R. APPLICATION OF SUNFLOWER STEMS' PITH FOR THE PRODUCTION OF THERMAL INSULATION MATERIALS..... | 276 |
| Melnyk L.I., Sviderskyi V.A. POLYMER COMPOSITE MATERIAL BASED ON PEARLITE..... | 281 |
| Frolova L.A., Mandryka A.G., Rodin D.O., Nikitin M.O., Frolov O.O. STRUCTURAL AND MAGNETIC PROPERTIES OF MODIFIED COBALT FERRIT NANOPARTICLES..... | 288 |

TECHNOLOGY OF FOOD PROCESSING AND CONSUMER GOODS INDUSTRY

| | |
|---|-----|
| Pavliuk S.K., Sukha I.V. ECOLOGICAL ASPECTS REGARDING PACKAGING: THE PROBLEM OF PET PACKAGING, AND ITS DISPOSAL..... | 292 |
|---|-----|

TRANSPORT

| | |
|--|-----|
| Bykovets N.P. ANALYSIS OF TRAFFIC ON THE DANUBE RIVER IN PRESENT CONDITIONS..... | 297 |
| Boiko S.M., Kotov O.B., Zhukov O.A., Koval A.M., Rykov G.Yu., Lapina O.S. RELEVANCE AND FEATURES OF IMPLEMENTATION OF RENEWABLE SOURCES OF ELECTRICAL ENERGY IN THE CONDITIONS OF RAILWAY TRANSPORT..... | 303 |
| Gurch L.M., Maistruk V.O. CURRENT STATE AND PROSPECTS OF DEVELOPMENT OF THE TRANSPORT AND LOGISTICS SYSTEM IN UKRAINE IN THE POST-WAR PERIOD..... | 308 |
| Pavlovska L.A., Korobkova O.M., Shpak N.G. FORMATION OF THE INFRASTRUCTURE FRAMEWORK OF THE DIESEL FUEL DELIVERY SCHEME IN FLEXI-TANKS UNDER THE CONDITIONS OF MARTIAL LAW..... | 314 |
| Turpak S.M., Ostrohliad O.O., Vasylieva L.O., Kharchenko T.V., Tretyak V.I. ECONOMIC ANALYSIS OF LIMESTONE DELIVERY BY DIFFERENT TYPES OF RAILWAY ROLLING STOCK..... | 321 |
| Fomin O.V., Prokopenko P.M., Fomina A.M., Gunko E.V. RESEARCH OF THE STRENGTH OF THE WAGON MODEL 918 AND THE POSSIBILITY OF CONVERSION (WITH THE INTRODUCTION OF COMPOSITES) FOR THE TRANSPORTATION OF BULK CARGO..... | 327 |

| | |
|---|-----|
| Fomin O.V., Kozynka O.S., Fomina A.M., Lisnychyi V.S. APPLICATION OF SOFT POLYMER COATINGS FOR LOAD-BEARING COMPONENTS OF ROLLING STOCK..... | 332 |
|---|-----|

CONSTRUCTION

| | |
|---|-----|
| Arinushkina N.S., Hryshchenko T.M. USE OF FOAMED BITUMEN IN EXECUTION VEHICLE CONSTRUCTION AND REPAIR WORKS ROADS..... | 337 |
|---|-----|

| | |
|---|-----|
| Kostin D.Yu., Arinushkina O.O., Tetera V.S., Sun D. THE INFLUENCE OF THE INITIAL RAW MATERIAL GENESIS ON THE FROST RESISTANCE OF CEMENT STABILIZED AGGREGATE MIXTURES..... | 342 |
|---|-----|

| | |
|--|-----|
| Savchenko O.V., Nizhnyk V.V., Savchenko T.O. PROGRAM AND METHOD OF EXPERIMENTAL RESEARCH OF THE INFLUENCE OF FIRE PROTECTION SYSTEMS ON INDIVIDUAL FIRE RISK..... | 348 |
|--|-----|

GEODESY

| | |
|---|-----|
| Pilicheva M.O. EXISTING APPROACHES TO PRICING IN THE SPHERE OF LAND MANAGEMENT..... | 354 |
|---|-----|

ELECTRONICS

| | |
|--|-----|
| Burkovskiy Ya.Yu., Zinkovsky Yu.F. SIMPLIFIED SHUNT BANDWIDTH CHARACTERIZATION GENERATOR FOR WIDE BANDGAP POWER CONVERTERS..... | 359 |
|--|-----|

| | |
|---|-----|
| Tomashevskiy R.S., Vasylichuk D.P., Zaluzhna H.V., Semenets D.A. METHOD FOR MEASURING PARAMETERS OF THE EQUIVALENT ELECTRICAL CIRCUIT OF A PIEZORESONANT SENSOR BASED ON ZERO PHASE FREQUENCY MEASUREMENTS.... | 366 |
|---|-----|

| | |
|--------------------------------|-----|
| INFORMATION ABOUT AUTHORS..... | 373 |
|--------------------------------|-----|

МАШИНОЗНАВСТВО

УДК 621.313

DOI <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2024.4/01>**Поліщук М.М.**Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»**Ролік О.І.**Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

ДРОН ДЛЯ ТЕХНІЧНОГО ОБСЛУГОВУВАННЯ ТРУБ ВЕЛИКОГО ДІАМЕТРУ

У сучасній промисловості використовуються вертикальні трубопроводи великого діаметру різного виробничого та комунального призначення, наприклад такі, як димарі теплових електростанцій, шахти ядерних реакторів та їм подібні споруди. У теперішній час періодичне технічне обслуговування зазначених об'єктів виконується із залученням професійних альпіністів, що становить загрозу здоров'ю та життю людини. Альтернативою вирішення цієї проблеми може бути застосування безпілотних літальних апаратів, точніше дронів у вигляді квадрокоптерів або мультикоптерів. При виконанні різноманітних технологічних операцій, таких як діагностика внутрішніх поверхонь труб, їх очищення та нанесення захисних покриттів, механічна обробка та інших виробничих операцій, виникає проблема узгодження аеродинамічної тяги, що розвивається дроном, гравітаційних та допустимих технологічних навантажень. Вирішенню саме цього завдання присвячені справжні дослідження, які включають об'єкти інженерної та наукової новизни. До перших відносяться принципово нові конструктивні рішення дрону та його технологічного оснащення, до других – графоаналітичні залежності вказаних вище параметрів.

Основною перевагою запропонованого дрона є його здатність обслуговувати вертикальні трубопроводи великого діаметра, долаючи при цьому гравітаційне навантаження навіть при виконанні силових технологічних операцій. Дрон містить маніпулятор, встановлений на його платформі та пристрій періодичної фіксації на вертикальній поверхні трубопроводу у вигляді вакуумних захватів. У статті запропоновано модель дрону на основі рівнянь рівноваги квазістатистичного стану, внаслідок чого отримано аналітичні залежності для розрахунку параметрів функціонування дрону. Викладено результати моделювання співвідношень аеродинамічної тяги та допустимих технологічних навантажень. Основною мотивацією проведених досліджень є зниження вартості технічного обслуговування внутрішніх поверхонь вертикальних трубопроводів при одночасному виключенні праці людини та передачі їй лише функцій управління.

Ключові слова: безпілотні літальні апарати, квадрокоптер, моніторинг труб, аеродинамічна тяга, інформаційна система, керування дроном, моделювання.

Постановка проблеми. Не дивлячись на різноманіття сучасних моделей дронів у вигляді квадрокоптерів чи мультикоптерів, до тепер відсутні безпілотні літальні апарати, що здатні виконувати не тільки відеоспостереження чи діагностику промислових споруд, а й виконувати силові технологічні операції, що входять до переліку технічного обслуговування вертикальних труб великого діаметру. Крім конструктивних рішень вказаних апаратів, потрібно визначити аналітичні залежності співвідношень аеродинамічної тяги дрону

із силою утримання дрону на поверхні обробки та допустимих технологічних навантажень при виконанні дроном виробничих функцій.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Дослідникам та інженерам вже відомі приклади оригінальних конструкцій машин для технічного обслуговування трубопроводів. Як правило, такими машинами є мобільні роботи чи транспортні пристрої з дистанційним керуванням. Спеціально для діагностики та очищення трубопроводів, у тому числі і вертикальних, ство-

рено мобільний робот [1] під назвою Jetty Robot, оснащений гусеничною трансмісією, розміщеною на шарнірних паралелограмах, які дозволяють роботу обслуговувати трубопроводи діаметром до 1350 мм, що проте недостатньо для труб великого діаметра. Мобільний технологічний модуль [2, с. 362–364] здатний здійснювати технічне обслуговування вертикальних труб завдяки наявності еластичних тороїдальних камер, що знаходяться під тиском. Однак при використанні даного модуля для труб великого діаметру вказані еластичні камери стають занадто великими, що не виправдано з економічної точки зору. У роботі [3, с. 406–408] представлені нові технології та обладнання для діагностики внутрішніх поверхонь трубопроводів, що обслуговуються мобільними технологічними модулями, але без виконання силових технологічних операцій. Оригінальну конструкцію має апарат [4, с. 2–5] що складається з декількох секцій, які мають по два ступені свободи, утворюючи гнучкий корпус, який можна адаптувати для руху всередині труб, але без подолання гравітаційного навантаження по вертикалі.

Експериментальні дослідження [5, с. 74–77] підтверджують необхідність створення обладнання для профілактичного обслуговування таких вертикальних труб як димарі, тому що повністю уникнути процесу карбонізації та корозії арматури поки що не вдається. Особливий інтерес викликає мобільний робот [6, с. 12–14], створений для переміщення всередині вертикальних труб. Цей робот використовує пружні поршні, які притискають колеса до стінки труби для забезпечення тертя при вертикальному переміщенні. Крім того, цей робот має інструменти для виконання технологічних операцій з очищення димоходів, але невеликого діаметра. У статті [7] наголошується на тестуванні дрону Elios, створеному спеціально для обстеження таких висотних об'єктів як промислові димарі. Завдяки міцному каркасу зазначений дрон може стикатися з перешкодами на своєму шляху та продовжувати політ, залишаючись неушкодженим. Однак цей дрон призначений для діагностики та відеоспостереження висотних об'єктів, але не для виконання силових технологічних операцій. У Шотландії компанія з обслуговування комунальних мереж Scottish Water вперше у Великобританії стала використовувати дрони [8] для перевірки магістральних каналізаційних труб великого діаметру. Однак відсутність у таких дронів спеціального технологічного обладнання не дозволяє виконувати силові операції. Заслуговує

на увагу літаючий дрон [9, с. 2–4] для обстеження внутрішніх стінок трубопроводів, що містить транспортний пристрій із колісною трансмісією, та фотоапаратуру для зйомок ділянок внутрішніх поверхонь горизонтальних труб, наприклад, каналізаційних. Але не спроможність цього комплексу обладнання до технічного обслуговування вертикальних труб обмежує його технологічні можливості. На відміну від розглянутих вище розробок дрон [10, с. 3] для миття поверхонь, крім повітряних гвинтів з двигунами, містить щітку для миття поверхонь, водяну помпу із приєднаними до неї шлангами, що з'єднані також із цистернами з рідиною, а також систему керування с датчиками відстані. Однак відсутність можливості виконання силових операцій технічного обслуговування поверхонь споруд обмежує технологічні можливості цього дрону тільки операціями очищення.

Таким чином, аналіз розглянутих вище досліджень та технічних рішень показує, що проблема створення безпілотних летальних апаратів для технічного обслуговування вертикальних труб великого діаметра залишається актуальною.

Постановка завдання. Необхідно створити дрон у вигляді квадрокоптера, який був би спроможний здійснювати технічне обслуговування вертикальних труб великого діаметру, виконуючи не тільки операції очищення поверхонь труб та нанесення захисних покриттів, а й також силові технологічні операції механічної обробки поверхонь труб. Також для надійного функціонування такого дрону необхідно розробити аналітичні залежності узгодження аеродинамічної тяги, що розвивається гвинтами дрону, із силою утримання дрону на поверхні обробки та допустимими технологічними навантаженнями.

Виклад основного матеріалу дослідження.
Конструкція дрону. Для кращого розуміння запропонованої нижче аналітичної моделі спочатку розглянемо принципово нову конструкцію [11, с. 6–7] дрону, що представлений на рис. 1, та процес його функціонування. Дрон містить квадрокоптер з гвинтами та їх приводи від електродвигунів. На корпусі квадрокоптера встановлено маніпулятор для виконання технологічних операцій, вакуумні захвати для фіксації дрона на поверхні обслуговування, приводну щітку для очищення поверхні труби та відеокамеру на руці маніпулятора.

Технологічне оснащення дрону з'єднано зі стаціонарним обладнанням, що розміщено на платформі, через гнучкий шланг з герметичними сферичними шарнірами (для запобігання перекручування шлангу) та колектор, який перемика-

ється за командами оператора залежно від виду технологічної операції. До складу стаціонарного обладнання входять вакуумний насос для вакуумних захватів, цистерна 1, також з вакуумним насосом для збору відходів очищення поверхні труб за допомогою приводної щітки, цистерна 2 для подачі миючої рідини гідравлічним насосом, а також цистерна 3 для подачі технічного розчину в екструдер, що встановлений на руці маніпулятора.

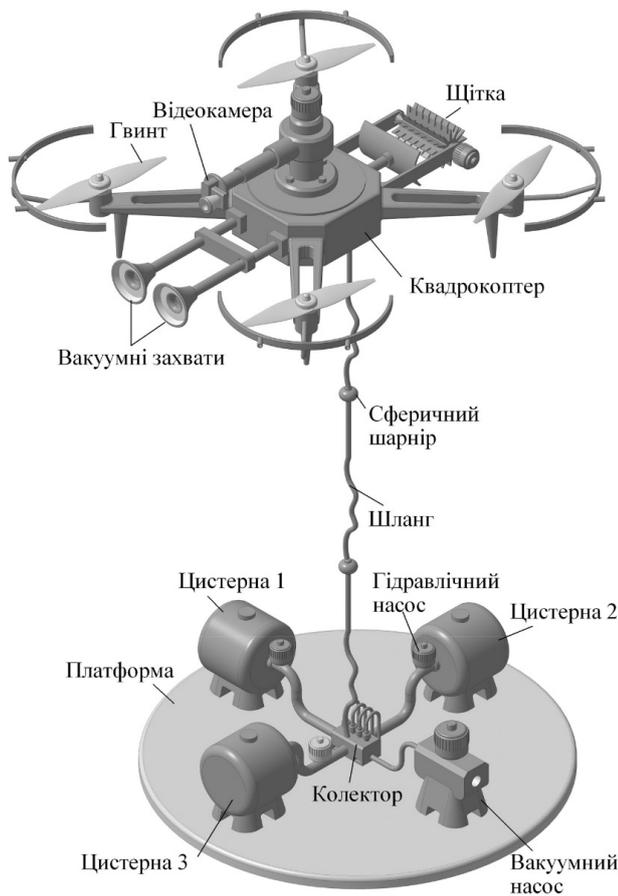


Рис. 1. Дрон для технічного обслуговування вертикальних труб

Маніпулятор квадрокоптера має три ступені волі, а саме поступальні переміщення (рис. 2): горизонтальне $\pm x$ та вертикальне $\pm y$, а також обертальне переміщення $\pm \alpha$. На кисті руки маніпулятора встановлено приводну дискову фрезу та екструдер, через який подається технічний самотвердіючий розчин для ремонту тріщин на поверхнях вертикальних труб. Дистанційні датчики, що встановлені на захисних дугах гвинтів, призначені для контролю мінімально допустимого відстані наближення квадрокоптера до поверхні обслуговування.

Також квадрокоптер оснащений приводною щіткою для очищення поверхонь труб, поперечний переріз якої показано на рис. 3. До кожуху щітки

приєднано шланг, через який вакуумним насосом висмоктуються відходи очищення поверхонь труб для їх збирання в цистерні 1 (див. рис. 1).

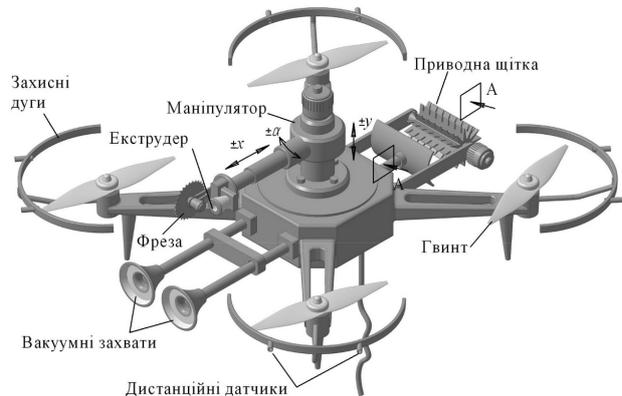


Рис. 2. Квадрокоптер для обслуговування вертикальних труб

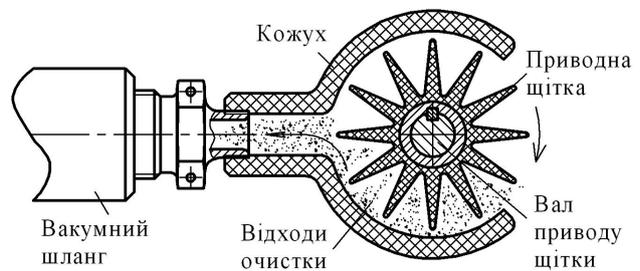


Рис. 3. Приводна щітка для очищення поверхонь (див. переріз А-А на рис. 2)

Таким чином, дрон оснащений всім необхідним обладнанням для технічного обслуговування вертикальних труб великого діаметру. У початковому стані дрон на своїх опорах знаходиться на платформі, розміщеної в середині труби великого діаметру. Залежно від виробничого завдання та за командами оператора (або заздалегідь розробленої програми) дрон виконує різні технологічні операції. У разі очищення внутрішньої поверхні труби до дрону приєднується відповідний трубопровід, а колектор (рис. 1) перемикається на цистерну 1 з вакуумним насосом. Дрон злітає і наближається до поверхні труби, після чого вмикається привід щітки. Керований оператором або відповідною програмою за певним алгоритмом дрон очищає щіткою поверхню труби, а відходи очищення поверхні труби, що обслуговується, через кожух (рис. 3) та гнучкий шланг висмоктуються насосом у відповідну цистерну.

У разі необхідності ремонту (тобто закладення розчином) тріщин на поверхні труби дрон сканує поверхню труби відеокамерою і при цьому записуються координати тріщин. Після чого дрон направляється до поверхні з тріщиною і за допомогою вакуумних захватів (рис. 2) зчіплюється з поверхнею труби. При цьому залежно від

величини зусилля операції різання при обробці тріщин, приводи гвинтів можуть бути вимкнуті або включені в режимі малих частот обертів пропелерів для часткової компенсації гравітаційного навантаження. Після зчеплення дрону вакуумними захватами з поверхнею труби вмикаються приводи маніпулятора з телескопічною рукою і фрези, якою обробляється контур тріщини на поверхні труби для подальшого заповнення тріщини розчином, який має здатність до затвердіння за певний час.

Після заміни трубопроводу і перемикавання колектора на цистерну 3 (див. рис. 1) з технічним розчином, насосом під тиском подається в екструдер технічний розчин для заповнення тріщини. У разі необхідності миття поверхні труби колектор перемикається на цистерну 2, з якою гідравлічним насосом подається рідина для миття поверхонь труб великого діаметру. Перемикавання колектора залежно від технологічної функції надає можливість використання різноманітного стаціонарного обладнання. При виконанні усіх операцій герметичні сферичні шарніри, що встановлені на шлангу, запобігають перекручуванню гнучкого шлангу, секції якого можуть повертатися на довільний кут.

Побудова статичної моделі. Оскільки при технологічних навантаженнях, тобто при виконанні силових операцій, наприклад, таких як механічна обробка, свердління, клепка, встановлення дюбелів й т.п., здійснюється фіксація дрону на поверхні труби вакуумними присосами, то вкрай потрібно записати умови втримання дрону на поверхні труби, а точніше розробити аналітичні залежності узгодження аеродинамічної тяги, що розвивається гвинтами дрону, із силою утримання дрону на поверхні обробки та допустимими технологічними навантаженнями. На рис. 4 показана схема сил та реакцій, що діють на квадрокоптер при його навантаженні. Під час виконання технологічної операції (наприклад, механічної обробки фрезою тріщини або зчищення нашарування на стінці труби) квадрокоптер разом з технологічним оснащенням будемо уважати одним твердим тілом певної маси.

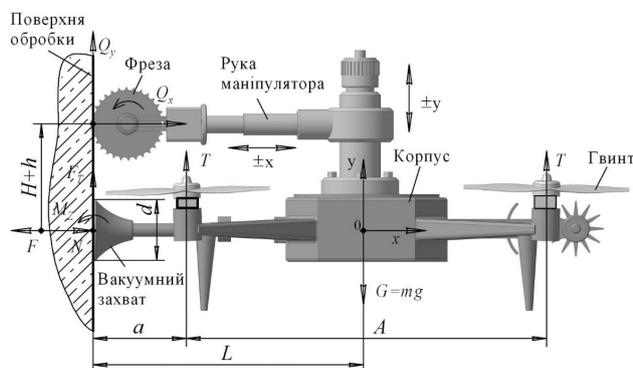


Рис. 4. Схема сил та реакцій, діючих на тіло квадрокоптера

Початок системи координат $Oxyz$ виберемо посередині відрізка, який сполучає центри двох присосів вакуумних захватів, за допомогою яких тіло утримується на поверхні обробки. Як видно зі схеми рис. 4, вісь Oy напрямлена вертикально вгору, вісь Ox напрямлена вправо по горизонталі, вісь Oz перпендикулярна до площини Oxy . На тіло (тобто на квадрокоптер разом з оснащенням) буде діяти така система зовнішніх сил: сила ваги $G=mg$ ($g=9,8\text{м/с}^2$ – прискорення земного тяжіння) напрямлена вертикально донизу; підйомна сила (аеродинамічна тяга) T одного гвинта квадрокоптера (таких сил чотири і усі вони напрямлені вертикально вгору). Ця сила у залежності від кутової швидкості гвинтів квадрокоптера може змінюватися у широких межах. Наприклад у спеціально призначених для квадрокоптерів популярних двигунів моделі KV120 (виробник T-MOTOR) в діапазоні кутової швидкості 2548...4742 об/хв. аеродинамічна тяга змінюється в межах $55\text{Н} < T < 204\text{Н}$. Сила Q_x – притискання фрези до поверхні обробки, напрямлена паралельно до вісі Ox ; сила Q_y – різання фрезою поверхні обробки, напрямлена уздовж вісі Oy . Сила F одного присосу вакуумного захвату визначається за формулою:

$$F = SK_s(p_a K_a - p_z)K, \quad (1)$$

де S – площа, обмежена внутрішнім контуром присоса (м^2), $S = \pi d^2 / 4$; $d = (0,1...0,3)$, м – діаметр зони вакуумування; K_s – коефіцієнт зменшення площі присоса внаслідок деформації ущільнення ($K_s = 0,95$) для ущільнень пористих гум); $p_a = 101 \times 10^3$ (Па) – атмосферний тиск; $p_z = 50 \times 10^3$ (Па) – залишковий тиск всередині камери (глибина вакууму); K_a – коефіцієнт, яким ураховують зміни атмосферного тиску ($K_a = 0,9$); K – коефіцієнт, яким ураховують приплив повітря у місці контакту ущільнення камери присоса з поверхнею об'єкта ($K = 0,85$). Тобто для діапазону діаметрів присосу $d = 0,1...0,3\text{м}$ сила одного присосу складає 257...2311 Н, відповідно для двох вакуумних захватів: 514...4622 Н. Сили F від вакуумних захватів напрямлені протилежно до вісі Ox .

Уздовж контуру присосу діаметром d з боку контуру поверхні обробки діє розподілене погонне зусилля $q(\beta)$, яке наближено можна подати у вигляді

$$q(\beta) = B - C \sin(\beta), \quad 0 < \beta < 2\pi \quad (2)$$

де $B = \frac{N}{\pi d}$; $C = \frac{4M_z}{\pi d^2}$; N – головний вектор зусиль $q(\beta)$ (нормальна реакція паралельна до вісі Ox); M_z – момент зусиль $q(\beta)$ відносно вісі Oz .

З формули (2) видно, що при $C \geq B$, тобто при $M_z \geq Nd / 4$ порушується герметичність присосу

вакуумного захвату. У місці контакту присосів з поверхнею труби ще виникають сили тертя F_T , які паралельні до вісі Oy (див. рис. 4). Як відомо, у загальному випадку для твердого тіла можна скласти 6 рівнянь рівноваги. Але, у даному випадку, усі сили паралельні до площини Oxy і має місце силова симетрія відносно цієї площини, то для забезпечення статичної визначеності достатньо скласти лише три рівняння рівноваги, а інші три рівняння задовольняються тотожно. З урахуванням дії сил, показаних на рис. 4, система рівнянь має вигляд:

$$\begin{cases} \sum_{k=1}^{k=n} (F_k)_x = 0; & 2N - 2F + Q_x = 0, \\ \sum_{k=1}^{k=n} (F_k)_y = 0; & 4T - G + Q_y + 2F_T = 0, \\ \sum_{k=1}^{k=n} (F_k)_z = 0; & 2Ta + 2T(a + A) - GL - Q_x(H + h) + 2M_z = 0, \end{cases} \quad (3)$$

де позначення відстань A , a , H та h див. на рис. 4.

Для останнього рівняння моментів із системи (3) можна записати так:

$$(4T - G)L - Q_x(H + h) + 2M_z = 0 \quad (4)$$

З рівнянь (3) та (4) знаходимо: значення нормальній реакції

$$N = F - Q_x / 2; \quad (5)$$

сили тертя

$$F_T = (G - 4T - Q_y) / 2, \quad (6)$$

та значення моменту навколо вісі z

$$M_z = ((G - 4T)L + Q_x(H + h)) / 2 \quad (7)$$

Щоб не було проковзування присосів під дією технологічного навантаження сили тертя повинні задовольняти умові

$$\begin{aligned} F_T < \mu_1 N &= \mu_1 (F - Q_x / 2); \\ F_T > -\mu_1 N &= -\mu_1 (F - Q_x / 2), \end{aligned} \quad (8)$$

де $\mu_1 = 0,2 \dots 0,5$ – коефіцієнт тертя ковзання матеріалу присосу і робочої поверхні. Надалі, будемо вважати, що $Q_y = \mu_2 Q_x$ ($\mu_2 = 0,7 \dots 0,8$). Підставляємо вираз (6) у (8) і отримаємо дві нерівності відносно сили Q_x

$$(\mu_2 - \mu_1)Q_x > G - 4T - 2\mu_1 F; \quad Q_x < \frac{2\mu_1 F_T + G - 4T}{\mu_2 + \mu_1}. \quad (9)$$

Перша нерівність з виразів (9) виконується завжди. Щоб не було розгерметизації вакуумних присосів момент M_z повинен задовольняти умові

$$\begin{aligned} M_z < \frac{Nd}{4} &= \frac{d(F - Q_x / 2)}{4}; \\ \text{або } M_z > -\frac{Nd}{4} &= -\frac{(F - Q_x / 2)d}{4}. \end{aligned} \quad (10)$$

Підставляємо вираз (7) у (10) і отримаємо дві нерівності відносно сили притискання фрези до

поверхні обробки Q_x , тобто шукане обмеження сили технологічного навантаження:

$$Q_x < \frac{(4T - G)L + dF / 2}{H + h + d / 4}. \quad (11)$$

$$Q_x > \frac{(4T - G)L - dF / 2}{H + h - d / 4}. \quad (12)$$

Моделювання системи. Моделювання параметрів функціонування квадрокоптера здійснювалось при початкових умовах: сили аеродинамічної тяги одного гвинта $T_{\min} = 55$ Н; $T_{\max} = 204$ Н (всього гвинтів чотири); ваги квадрокоптера $m = 18$ кг; гравітаційної сили $G = m \cdot 9,8$ Н; коефіцієнтів тертя $\mu_1 = 0,3$; $\mu_2 = 0,8$; значення відстані від осі присосу вакуумного захвату до осі маніпулятора $H = 0,5$ м; довжина пиляння фрезою $h = 0,3$ м; відстань від центра ваги квадрокоптера до поверхні обробки $L = 1,25$ м; відстань від поверхні обробки до вісі першого гвинта $a = 0,5$ м (див. рис. 4).

На рис. 5 представлені графіки залежності сили зчеплення одного вакуумного захвату від діаметру присосу, при різних промислово придатних значеннях залишкового тиску (глибини вакууму) $p_1 \dots p_4$ під присосом захвату. Наприклад, порівнюючи значення сили зчеплення F (рис. 5) при глибині вакууму $p_1 = 40 \cdot 10^3$ Па з припустимими значеннями технологічного навантаження (див. зафарбовану дільницю на рис. 6 та рис. 7), стає очевидним, що для надійного утримання квадрокоптера на поверхні обробки достатньо двох присосів при їх діаметрах в діапазоні значень $d = (0,2 \dots 0,25)$ м. У разі збільшення технологічного навантаження Q_x , як це показано на рис. 8, слід збільшити діаметри двох присосів до $d = 0,3$ м.

Одночасно слід враховувати величину аеродинамічної тяги T одного гвинта квадрокоптера (а їх, як відомо, чотири). На графіках рис. 6–8 зафарбованими дільницями показані зони припустимого робочого технологічного навантаження, де штрихова лінія відповідає формулі (9), штрихпунктирна – формулі (11), а суцільна лінія – формулі (12).

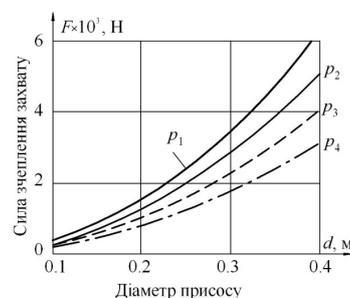


Рис. 5. Залежність сили зчеплення вакуумного захвату від діаметру присосу при глибині вакууму:
 $p_1 = 40 \cdot 10^3$ Па; $p_2 = 50 \cdot 10^3$ Па;
 $p_3 = 60 \cdot 10^3$ Па; $p_4 = 70 \cdot 10^3$ Па

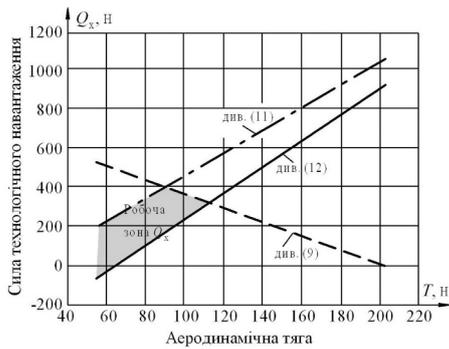


Рис. 6. Залежність сили технологічного навантаження від аеродинамічної тяги при $d=0.2$ м

Таким чином, робоче значення технологічного навантаження Q_x потрібно вибирати завжди нижче і штрихової лінії, і штрих-пунктирної лінії, але вище суцільної лінії. Звичайно, що завжди $Q_x > 0$, навіть коли квадрокоптер виконує мало навантажених операцій, наприклад такі як очищення поверхні чи нанесення захисних покриттів.

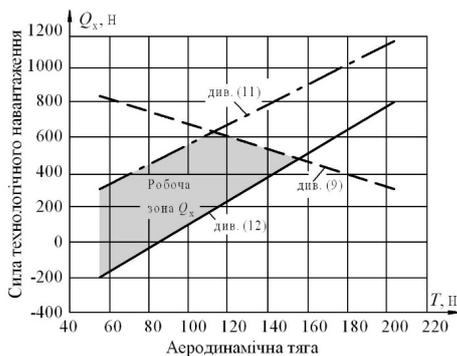


Рис. 7. Залежність сили технологічного навантаження від аеродинамічної тяги при $d=0.25$ м

Наведені графоаналітичні залежності можуть використовуватись дослідниками та інженерами при створенні дронів спеціального призначення. У разі зміни початкових даних, вони можуть бути внесені у відповідні формули (9), (11) та (12). При цьому зміняться тільки чисельні результати розрахунку параметрів, а характер залежностей залишиться сталим.

Список літератури:

1. Robot for diagnostics and cleaning of pipelines JettyRobot. Internet resource. URL: <https://www.jettyrobot.com/> (date of the application 20.02.2022).
2. M. Polishchuk, V. Yahlinskyi. Mobile Technology Module for Pipeline Maintenance: Design and Simulation. FME Transactions. Volume 50, No 2, 2022, pp. 360–368.
3. Tiehua Hu, Jingbo Guo. Development and application of new technologies and equipment for in-line pipeline inspection. Natural Gas Industry B, Volume 6, Issue 4, 2019, Pages 404-411, ISSN 2352-8540.

¹ Дослідження виконувались у межах проекту Національного фонду досліджень України № 2023.04/0077 «Дрон для забору проб води».

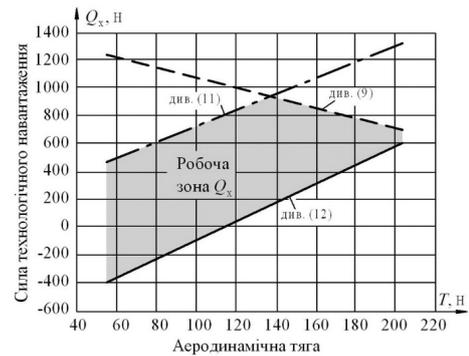


Рис. 8. Залежність сили технологічного навантаження від аеродинамічної тяги при $d=0.3$ м

Висновки. В результаті проведених досліджень, створено принципово нову конструкцію дрона для технічного обслуговування вертикальних труб великого діаметру, який здатний виконувати не тільки моніторинг стану труб, а й силові технологічні операції механічної обробки поверхонь обслуговування. Принциповою відмінністю запропонованого дрону є наявність пристроїв періодичного утримання дрону на поверхні обробки у вигляді вакуумних захватів та маніпулятора, встановлених на корпусі квадрокоптера для виконання технологічних операцій.

Побудована аналітична модель функціонування квадрокоптера у вигляді рівнянь квазістатичного стану дозволяє дослідникам та інженерам розраховувати параметри функціонування подібних безпілотних літальних апаратів.

Надані графоаналітичні залежності дозволяють визначати чисельні співвідношення аеродинамічно тяги, що створюють гвинти квадрокоптера, із силою періодичної фіксації його на поверхні обслуговування та максимально припустимими значеннями технологічного навантаження.

В остаточному підсумку отримані результати дослідження надають достатні підстави ствердження доцільності використання безпілотних літальних апаратів, навіть з виконанням силових операцій, для технічного обслуговування висотних промислових споруд при одночасному виключенні безпосередньої праці людини та передачі їй лише функцій управління¹.

4. J. Borenstein, Geoffrey A. Long, Mariпа Del Rey. Apparatus for obstacle traversal. Patent US № 6512345 Int. Cl. B08B9/045. Filed: Mar. 30, 2001; Date of Patent: Jan. 28, 2003.
5. Jan Mlčoch, Jana Marková, Miroslav Sýkora. Maintenance optimization of industrial chimneys exposed to carbonation. Civil Engineering Series, Vol. 17, No. 2, 2017, pp. 73–78.
6. Simon Nilsson, Johan Widmark. Robot for vertical in-pipe climbing. Degree project in Stockholm, Sweden 2019. pp. 11–16.
7. Дрони та димарі або український досвід використання. Інтернет ресурс. URL: <https://drone.ua/ru/blogs/news/dronyi-i-dyimohodyi-ili-ukrainskiy-opuyit-ispolzovaniya-elios-2> (дата звернення: 20.05.2024).
8. Використання дронів-безпілотників для перевірки магістральних каналізаційних труб. Інтернет ресурс. URL: <http://green.obob.tv/ispolzovanie-dronov-bespilotnikov/> (дата звернення: 28.09.2022).
9. Mikio Urabe. Survey equipment and computer programs for inner walls of pipelines. Patent Japan JP7019010 Int. Cl. B64C 39/02. Filed: 2020.10.21. Date of Patent: 2022.2.14.
10. Patent WO2019180479 Int. Cl. B64C 27/08. Surface washing drone. Filed: 19.03.18. Date of Patent: 26.09.19.
11. Ролік О.І., Поліщук М.М. Дрон для технічного обслуговування труб великого діаметру: заявка на видачу патенту України на винахід № а202305577; МПК В64С39/02; реєстр. 21.11.2023. *Український національний офіс інтелектуальної власності та інновацій*. 2024, 14 с.

Polishchuk M.M., Rolik O.I. DRONE FOR MAINTENANCE OF LARGE DIAMETER PIPES

In modern industry, large-diameter vertical pipelines are used for various industrial and utility purposes, such as thermal power plant chimneys, nuclear reactor shafts, and similar structures. Currently, the periodic maintenance of these objects is performed with the involvement of professional climbers, which poses a threat to human health and life. An alternative solution to this problem may be the use of unmanned aerial vehicles, or rather drones in the form of quadcopters or multicopters. When performing various technological operations, such as diagnostics of the internal surfaces of pipes, their cleaning and application of protective coatings, mechanical processing and other production operations, the problem of harmonizing the aerodynamic thrust developed by the drone, gravitational and permissible technological loads arises. Real research, which includes objects of engineering and scientific novelty, is devoted to the solution of this task. The first include fundamentally new design solutions for the drone and its technological equipment, and the second include analytical and graphic dependencies of the above parameters.

The main advantage of the proposed drone is its ability to service large-diameter vertical pipelines, while overcoming the gravitational load even when performing power technological operations. The drone contains a manipulator installed on its platform and a device for periodic fixation on the vertical surface of the pipeline in the form of vacuum grippers. The article proposes a model of a drone based on the equations of quasi-statistical equilibrium, as a result of which analytical dependencies are obtained for calculating the parameters of the drone's functioning. The results of modeling the ratios of gravitational load, aerodynamic thrust and permissible technological loads are presented. The main motivation of the conducted research is to reduce the cost of maintenance of the internal surfaces of vertical pipelines while eliminating human labor and transferring only management functions to him.

Key words: *unmanned aerial vehicles, quadrocopter, pipe monitoring, aerodynamic thrust, information system, drone control, modeling.*

ОБРОБКА МАТЕРІАЛІВ У МАШИНОБУДУВАННІ

УДК 621.762

DOI <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2024.4/02>

Казмиренко Ю.О.

Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова

Лебедєва Н.Ю.

Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова

Довженко Д.В.

Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова

Риженко М.С.

Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова

Баюнов А.О.

Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова

ФОРМУВАННЯ КАРКАСНОЇ СТРУКТУРИ ПРЕСОВОК З ПОРОШКУ ТА СТРУЖКИ МІДІ

Актуальність досліджень зумовлена необхідністю застосування мідних пористих матеріалів у енергетичному машинобудуванні, хімічній промисловості, авіабудуванні тощо. Методами порошкової металургії виготовляються антифрикційні вироби, паливні та фільтрувальні елементи, пористість яких перевищуватиме 30 %. Технологічний цикл складається з операцій підготовки порошку, його пресування, спікання та наступного просочення рідкими компонентами. Порошки міді є дефіцитною і дороговартісною сировиною. Проте у чистому вигляді порошок міді не матиме тих властивостей, які необхідні для формування функціональних матеріалів. Тому за основу обирається пористий каркас, для виготовлення якого доцільно використовувати виробничі відходи, зокрема здрібнену стружку. Це спрямовано на вирішення проблеми ресурсозбереження. Мета роботи полягатиме у порівняльних дослідженнях процесів формування каркасної структури пресовок з порошку електролітичної міді та порошку, одержаного здрібненням мідної стружки.

Експериментальні роботи включали у себе: холодне однобічне пресування порошків на лабораторному пресі з питомим осьовим тиском 20 МПа, спікання заготовок при температурі 450...500°C у герметично зачиненому графітовому контейнері у лабораторній печі з окиснювальною атмосферою. За критерії структурних змін обрано розмір та форму пор, мікротвердість та ступінь деформації порошку, які визначалися на етапах пресування і спікання. Для досліджень застосовані методи оптичної металографії та механічних випробувань. Теоретично обґрунтовано та експериментально підтверджено можливість формування каркасної структури пресовок з порошку, одержаного здрібненням мідної стружки. Експериментально отримані заготовки відрізняються від пресовок з порошку електролітичної міді більш розвинутою пористою структурою, що є переважним для подальшого просочення напівфабрикатів іншими речовинами: фторопластом, розплавом срібла, розм'якшеним склом тощо.

Перспективи наступних досліджень пов'язані з розширенням експериментальних робіт щодо впливу технологічних параметрів на формування спеціальних властивостей пористих мідних матеріалів.

Ключові слова: порошок міді, мідна стружка, холодне однобічне статичне пресування, структура.

Постановка проблеми. Ефективність застосування мідних пористих матеріалів у енергетичному машинобудуванні, суднобудуванні, хімічній промисловості, авіабудуванні зумовлена їх коро-

зійною стійкістю, тепло- і електропровідністю, зносостійкістю. З них виготовляються антифрикційні вироби, паливні та фільтрувальні елементи. Їх певні функціональні властивості визначаються

не тільки хімічним складом компонентів, а й каркасною структурою, для формування якої застосовуються методи порошкової металургії.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Управління фізико-механічними процесами і регулювання характеристик пористих мідних матеріалів є *складною науково-практичною задачею*, вирішення якої спрямовано на вибір та розробку раціональних та ресурсозберігаючих технологій.

В роботі [1, с. 27-34] процеси формування пористих структур спечених порошкових матеріалів розглядаються за допомогою моделей, які враховують вплив геометрії пакування частинок губчастого титану на практичний процес регулювання пористості пресовки у межах 30...65 %.

Дослідження, наведені в роботі [2, с. 24-28], показують важливість процесів структуроутворення майбутнього матеріалу саме на етапі пресування. Автор аналізує форму пор, яка утворюється при пресуванні несферичних порошоків. Експериментальні дослідження проведені для суміші порошку заліза губчастою форми з пороутворювачем – бікарбонатом амонію, який являє собою кристали неправильної форми. Підкреслено вплив величини однобічного статичного тиску (від 100 до 700 МПа) на витягнуту форму пор.

Результати досліджень процесів консолідації антифрикційних матеріалів композиції Cu–Pb–С методами порошкової металургії висвітлені авторами роботи [3, с. 7-21]. Завдяки підібраним технологічним параметрам підготовки суміші, холодного пресування при 500 МПа та спікання при температурі 900 °С вироби гомогенної структури не матимуть тріщин і гарно обробляються різанням.

Складність підготовки порошоків електролітичної міді висвітлено у роботі [4, с. 55-64]. Авторами досліджуються процеси розмелу порошку у аتریаторах та у млинах планетарних і вібраційних типів. В залежності від режимів обробки та використаного обладнання одночасно матимуть місце процеси диспергування і агломерації. На підставі вищевикладного аналізу слід зазначити, що порошок міді, особливо електролітичної, являє собою дефіцитну сировину з високою хімічною чистотою, застосування якої у технологіях порошкової металургії не завжди є доцільним і рентабельним.

Вирішення проблем заміни мідного порошку полягатиме у використанні як сировинної бази виробничих відходів, чому присвячено роботи [5, с. 93-215; 6, с. 101-109]. У роботі [5, с. 93-215] авторами підкреслено, що переробка вторинних ресурсів міді являє собою важливу науково-технічну проблему, вирішення якої полягатиме у сор-

туванні лому та відходів, класифікації їх за розмірами, подрібненні, компактуванні з наступною переплавкою. Для цього застосовуються технології плавлення мідевмісних відходів у шахтних, відбивних або електричних печах, що є дуже енергоємним процесом, особливо в умовах воєнного стану і блекаутів. Результати досліджень [6, с. 101-109] підкреслюють актуальність проблеми ресурсозбереження, яка вирішується шляхом розробки технології пакування металеві стружки з подальшим її брикетуванням та переробки на порошок. В роботі як приклад розглядаються випадки формування брикетів зі стружки кольорових металів і сплавів. Практичний досвід формування псевдосплавного покриття з порошку бронзи і стружки бабіту на сталеву поверхню висвітлено в роботі [7, с. 24-27], для чого авторами застосовано технологія гарячого пресування.

В результаті ознайомлення з сучасною практикою отримання мідних пористих матеріалів за методами порошкової металургії [3-7], визначено, що:

- в процесах формування регульованої дрібнозернистої структури перевага надається використанню спеціально підготовленим порошкам електролітичної міді;

- ресурсозберігаючі технології орієнтовані на застосування альтернативних видів сировини, таких як здрібнена стружка з виробничих відходів.

Таким чином, *наукове протиріччя* полягатиме у відсутності теоретичних передумов для розробки спрощених виробничих процесів формування мідних пористих заготівок.

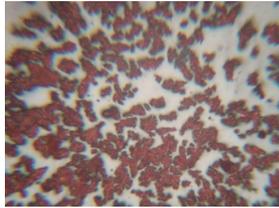
Постановка завдання. Мета роботи полягатиме у порівняльних дослідженнях процесів формування каркасної структури пресовок з порошку електролітичної міді та порошку, одержаного здрібненням мідної стружки.

Виклад основного матеріалу дослідження.

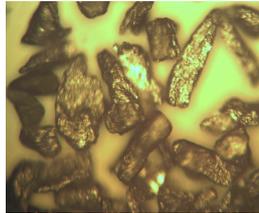
Матеріали та методи досліджень. Як науково-методичне підґрунтя для досліджень застосовано науково-практичні напрацювання авторів з формування мідних порошкових матеріалів і виробів [7, с. 24-27; 9, с. 105-106], основи теорії мідних сплавів [8, с. 342-357] та системно-аналітичний підхід до технологій рециклінгу виробничих відходів [10, с. 13-20].

Вибір та підготовка порошоків. Вибір вихідної сировини відбувався за двома альтернативними напрямками. У першому випадку застосовано порошок міді марки ПСМ-1 (ДСТУ 4960:2019, ІДТ) дисперсністю 40...60 мкм, у другому – використано пробну партію порошку, отриману шляхом механічного подрібнення стружки

бракованих напівфабрикатів з міді марки М1 (ДСТУ 3211-2009). Оптичні мікрофотографії порошоків наведено на рис. 1.



а, $\times 150$



б, $\times 150$

Рис. 1. Оптичні мікрофотографії ($\times 150$) порошку міді марки ПМС-1 (а) і порошку, отриманого механічним здрібненням стружки (б) [світлина зроблено авторами]

Морфологічні характеристики (середній розмір, фактор форми, питому поверхню) частинок досліджено методами оптичної металографії з використанням мікроскопів ММР-2Р і БИОЛАМ-И; мікротвердість порошку визначалась за допомогою приладу ПМТ-3 з навантаженням на індентор 50 мг. Результати досліджень показали, що середня дисперсність отриманого порошку міді (рис. 1, б) складатиме 120...180 мкм, фактор форми ставить 0,3...0,5; насипна щільність належить діапазону 1500...2000 кг/м³. Середній розмір частинок порошку електролітичної міді становить 60 мкм, фактор форми – 0,8.

Пресування порошоків. В роботі поставлено експериментальну задачу з дослідження можливості формування пористої заготовки за спрощеною технологічною схемою, для чого застосовано метод одnobічного холодного пресування. Порошок без пластифікатора засипали у внутрішню порожнину (висотою 130 мм і внутрішнім діаметром 16 мм) рознімної пресформи, виготовленої з нержавіючої сталі марки 10X18Н9Т (рис. 2). Задля запобігання утворення порожнеч і рихлостей порошок ретельно вирівнювали за допомогою верхнього пуансона, після чого обов'язково вимірювалася висота його засипання, що є необхідним для аналізу усадочних процесів.

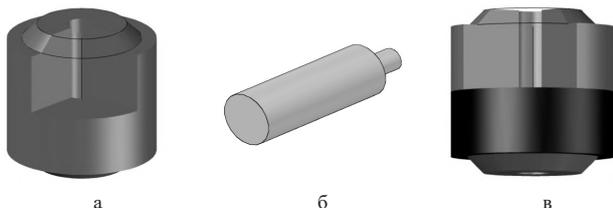


Рис. 2. Модель прес-форми: матриця (а); верхній пуансон (б); порошок у стані засипки (в) [3D-модель складено авторами]

На світлині (рис. 3) можна побачити як пресформа з порошком розташовується у середині лабораторного пресувального обладнання (FR1000/2), за допомогою якого під поступово зростаючим тиском відбувається формування мідної порошкової пресовки. Максимальне значення прикладеного осьового навантаження контролюється за допомогою манометра і складатиме 4 т (20 МПа). Тиск витримується протягом 1-2 хв, після чого починається процес розпресування.



Рис. 3. Лабораторна установка для пресування порошоків [світлина зроблено авторами]

Усадочні і деформаційні процеси досліджувались за результатами визначень лінійних показників засипок порошку та висоти пресовок (рис. 4), мікроскопічних досліджень розмірів і форми мідних порошоків, які були підкріплені вимірюваннями їх мікротвердості у складі шліфованих зразків.

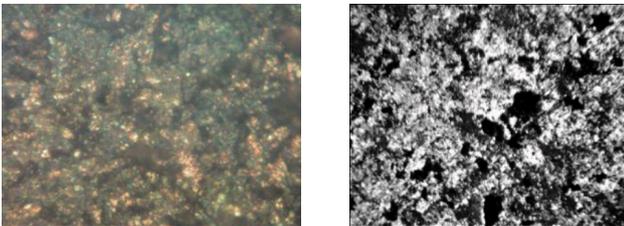


Рис. 4. Мідні пресовки [світлина зроблено авторами]

Аналіз отриманих результатів. Застосування електролітичного методу дає змогу отримувати тонкі, ультрадисперсні і навіть наноструктуровані порошки міді високої хімічної чистоти [11, с. 36-40]. Тому структура пресовки (рис. 5а), одержаної з порошку марки ПМС-1, являтиме собою щільно спресований каркас ($\rho = 4800$ кг/м³) з дрібними ($\approx 10...15$ мкм) і круп-

ними ($\approx 50 \dots 55$ мкм) порами округлої форми. Через холодне однобічне статичне пресування усадка порошкового тіла складатиме 35 %. Мікроструктурні дослідження показали незначну (до 5 %) лінійну деформацію частинок у напрямку, перпендикулярному напрямку пресування. Невеликий ступінь пластичного деформування окремих мідних частинок опосередковано підтверджується незначним приростом мікротвердості. У вихідному стані середнє значення $H_{\mu 50}$ становило 290 МПа, яке після холодного статичного пресування зросло до 306 МПа.

На відміну від порошоків електролітичної міді, порошок, отриманий зі стружки є більш пластичним. Під час холодного статичного пресування кожна частинка деформується у середньому на 15%, а загальна усадка пресовки становить навіть 60 %. Мікротвердість $H_{\mu 50}$ під дією пресування зростатиме майже удвічі: з 200 МПа до 350 МПа, що пояснюється явищем наклепу у пластично деформованому металі. Як показали мікроструктурні дослідження структура пресовки (рис. 5б) являтиме собою каркас щільністю 5100 кг/м^3 з порами еліпсоподібної форми, середній розмір яких становить 60 мкм. Таким чином, можна зробити висновок про доцільність застосування порошку, отриманого здрібненням мідної стружки для формування пресовок методом однобічного статичного пресування.



а б
Рис. 5. Оптичні мікрофотографії ($\times 370$) мікроструктури мідних пресовок з порошку міді марки ПМС-1 (а) і порошку, отриманого механічним здрібненням стружки (б) [світлина зроблено авторами]

Спінання застосовується для фіксації структури мідних пресовок. У традиційних випадках температурний інтервал обирається як $0,7 \dots 0,8$ від температури плавлення. Для антифрикційних матеріалів системи Cu-Pb-C він становить $890 \dots 910$ °C [3, с. 7-21]. Проте у даному випадку за мету ставиться не отримання максимально щільного порошкового тіла, а фіксування пористого каркасу з міцністю, достатньою для подальшого просочення рідкими компонентами. Задачу забезпечення спеціального середовища для спі-

кання мідних пресовок вирішено шляхом застосування герметично зачиненого контейнера (рис. 6), виготовленого з термічно необробленого графіту марки МПГ-6.



Рис. 6. Графітовий контейнер для спікання [світлина зроблено авторами]

Пресовка разом з контейнером зазнавала нагрівання до температури $450 \dots 600$ °C у лабораторній печі SNOL-1,6.2.08/9-M1 з окисною атмосферою; швидкість підйому температури не перевищувала $30 \dots 40$ °C/хв. Охолодження зразків відбувалося разом з контейнером і піччю при відкритих дверцятках. Структурні зміни пресовок, зокрема мікротвердість, ступінь деформації порошку, геометрія приконтатної області визначалися при температурі $450 \dots 500$ °C, що відповідатиме температурі рекристалізаційного відпалу мідних холоднокатаних дротів-провідників [12, с. 97-106]. Заключне формування каркасу пресовки відбувається за механізмом твердофазного спікання з незначним ($\approx 5 \dots 7$ %) збільшенням щільності. Прикладання невеликого тиску пресування (20 МПа) не сприятиме значному деформуванню порошоків у приконтатній області, проте запобігатиме появі пресувальних тріщин. Проте заготівки, які отримані з порошку здрібненої стружки, характеризуються більш розвинутою пористою структурою, що є важливим для подальшого просочення напівфабрикатів іншими речовинами: фторопластом, розплавом срібла, розм'якшеним склом тощо.

Порошкові заготівки, які далі будуть використані у технологіях інфільтрації, можна отримувати без застосування дорогого і складного обладнання.

Одержані результати спрямовані на вирішення важливої науково-технічної проблеми впровадження безвідходних технологій одержання функціональних порошкових матеріалів.

Висновки. Експериментальні роботи включали у себе: холодне однобічне пресування порошоків на лабораторному пресі з питомим

осьовим тиском 20 МПа, спікання заготовок при температурі 450...500 °С у герметично зачищеному графітовому контейнері у лабораторній печі з окиснювальною атмосферою.

Теоретично обґрунтовано та експериментально підтверджено можливість формування каркасної структури пресовок з порошку, одержаного здрібненням мідної стружки. Заготовки відрізняються від пресовок з порошку електролітичної

міді більш розвинутою пористою структурою, що є переважним для подальшого просочення напівфабрикатів іншими речовинами: фторопластом, розплавом срібла, розм'якшеним склом тощо.

Перспективи подальших досліджень пов'язані з розширенням експериментальних робіт щодо впливу технологічних параметрів на формування спеціальних властивостей пористих мідних матеріалів.

Список літератури:

1. Клименко Л. П., Андреев В. И., Случак О. И., Прищепов О. Ф., Щесюк О. В. Модель формування пористості брикетів губчастого титану на стадії спікання. *Авіаційно-космічна техніка і технологія*. 2023. № 1 (85) С. 27-34.
2. Руденко Н. О. Дослідження основних структурних характеристик високопористих порошкових матеріалів. *Науковий вісник Донбаської державної металургійної академії*. 2017. № 1 (22Е). С. 24-28.
3. Чишкала В. О., Литовченко С. В., Геворкян Е. С., Нерубацький В. П., Мазілін Б. О. Дослідження особливостей консолідації антифрикційних матеріалів на основі порошкової суміші Cu-Pb-C. *Збірник наук. праць Українського державного університету залізничного транспорту*. 2021. Вип. 198. С. 7-21.
4. Гончарук А. О., Хоменко О. В., Найда Ю. І. Особливості розмелу порошку електролітичної міді у млинах різного типу. *Електричні контакти і електроди*. 2014. С. 55-64.
5. Металургія кольорових металів: підручник. Ч.7. Вторинна металургія кольорових металів / Бредихін В.М., Маняк М.О., Смирнов В.О., Пожуєв В.І., Червоний І.Ф., Грицай В.П. Запоріжжя, 2009. 452 с.
6. Чернишов О. О., Чернишов О. В., Чухно С. І., Яновський В. А. Дослідження процесу пакування металеві стружки. *Технічна інженерія*. 2023. № 1(91). С. 101-109.
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. Інженерне матеріалознавство : підручник / Дубовий О. М., Казимиренко Ю. О., Лебедева Н. Ю., Самохін С. М. Миколаїв : НУК, 2009. 444 с.
9. Лебедева, Н. Ю., Дрозд О. В., Гашицька О. М., Буренко Г. М. Формування мідних пористих матеріалів з використанням виробничих відходів. *Комплексне забезпечення якості технологічних процесів та систем: Матеріали XIII Міжнародної науково-практичної конференції (м. Чернігів, 25–26 травня 2023 р.) : у 2 т. / відповідальний за випуск: Єрошенко Андрій Михайлович [та ін.]*. Т. 2. Чернігів, 2023. 360 с.
10. Казимиренко, Ю. О., Дрозд О. В. Системно-аналітичний підхід до підвищення ефективності рециклінгу виробничих скляних відходів. *Вісник Львівського торговельно-економічного університету*. 2022. № 29. С. 13-20.
11. Павленко Є. В., Єгоров С. Г. Сучасні методи одержання мідного порошку, що містить нанододатки. *Металургія*. 2015. Вип. 1(33) С. 36-40.
12. Федулова О. Ф. Особливості експертного дослідження оплавлень короткого замикання на провідниках, що зазнали тривалого відпалу в умовах пожежі. *Криміналістичний вісник*. 2017. № 2 (28) С. 97-106.

Kazymyrenko Yu.O., Lebedieva N.Yu., Dovzhenko D.V., Ryzhenko M.S., Baiunov A.O. FORMATION OF THE FRAME STRUCTURE OF PRESSES COPPER POWDER AND SHAVINGS

The relevance of the research is due to the need to use copper porous materials in power engineering, chemical industry, aircraft construction, etc. Powder metallurgy methods are used to manufacture antifriction products, fuel and filter elements, the porosity of which exceeds 30%. The technological cycle consists of powder preparation, pressing, sintering and subsequent impregnation with liquid components. Copper powders are scarce and expensive raw materials. However, in its pure form, copper powder will not have the properties that are necessary for the formation of functional materials. Therefore, a porous frame is chosen as a basis, for the manufacture of which it is advisable to use industrial waste, in particular crushed chips. This is aimed at solving the problem of resource conservation. The aim of the work will be to conduct comparative studies of the processes of formation of the framework structure of pressings from electrolytic copper powder and powder obtained by grinding copper shavings.

Experimental works included: cold one-sided pressing of powders on a laboratory press with a specific axial pressure of 20 MPa, sintering of blanks at a temperature of 450... 500 °C in a hermetically sealed graphite container in a laboratory furnace with an oxidizing atmosphere. The criteria for structural changes were the size and shape of the pores, microhardness and degree of deformation of the powder, which were determined at the stages of pressing and sintering. Methods of optical metallography and mechanical tests were used for research. The possibility of forming a frame structure of presses from powder obtained by grinding copper shavings has been theoretically substantiated and experimentally confirmed. Experimentally obtained blanks differ from presses from electrolytic copper powder by a more developed porous structure, which is preferable for further impregnation of semi-finished products with other substances: fluoroplastic, silver melt, softened glass, etc.

Prospects for further research are related to the expansion of experimental work on the influence of technological parameters on the formation of special properties of porous copper materials.

Key words: copper powder, copper shavings, cold one-sided static pressing, structure.

ГАЛУЗЕВЕ МАШИНОБУДУВАННЯ

УДК 621.039.4

DOI <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2024.4/03>**Гапонова О.П.**

Сумський державний університет

Тарельник Н.В.

Сумський національний аграрний університет

ДОСЛІДЖЕННЯ СТРУКТУРИ І ТРИБОЛОГІЧНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ MoS_2 -ПОКРИТТІВ, ОТРИМАНИХ МЕТОДОМ ЕЛЕКТРОІСКРОВОГО ЛЕГУВАННЯ¹

В статті розглянуті електроіскрові покриття, що містили MoS_2 , й отримані за пропонуваними авторами технологіями: перша полягала у нанесенні на оброблену поверхню пасти з вмістом сірки 33,3% і легування молибденовим електродом (покриття $Mo+S$), друга полягала у попередньому нанесенні на оброблену поверхню дисульфиду молибдену і легування молибденовим електродом (покриття $Mo+MoS_2$). Представлені результати дослідження структури, фазового складу і трибологічних властивостей. Встановлено, що самозмащувальні покриття, нанесені методом електроіскрового легування (ЕІЛ), мають складну структуру, що складається із верхнього пухкого не твердого шару, зміцненого білого шару, дифузійної зони і основного металу. Аналіз складу і зміни твердості у поперечному перерізі показали, що дифузія елементів відбулася на межі між покриттям і підкладкою. Це свідчить про те, що між покриттям і підкладкою формується міцний міжатомний зв'язок. Фазовий склад покриттів $Mo+S$ при енергії розряду ЕІЛ 3,4 Дж, представлений твердими розчинами ОЦК і ГЦК, а також MoS_2 , якого близько 8% на поверхні і ~5% на відстані 15 мкм від поверхні. Зі збільшенням енергії розряду в білому шарі покриття $Mo+MoS_2$ збільшується кількість і змінюється форма пор. Вони розподіляються рівномірно і мають округлу форму. Рентгеноструктурним аналізом встановлено, що фазовий склад поверхні покриттів представлений двома твердими розчинами з ОЦК кристалічною структурою, що відрізняються періодом ґратки, ГЦК твердим розчином – аустенітом, і MoS_2 . Дисульфиду молибдену виявляється 26-44% MoS_2 .

Самозмащувальні покриття демонструють дуже хороші трибологічні властивості порівняно з молибденовими ЕІЛ покриттями. Значно зменшується сила тертя у 10 разів для покриття $Mo+MoS_2$, більше 40 разів для покриття $Mo+S$ при $P=20$ Н, коефіцієнти тертя при цьому зменшуються у 10 і 40 разів, відповідно, для покриттів $Mo+MoS_2$ і $Mo+S$, а при $P=40$ Н зменшується у 64 рази для $Mo+S$ -покриття. Дослідження твердості і її розподілу в модифікованих шарах показали, що покриття мають приблизно однакові параметри, HV близько 1100, товщину ~60 мкм. Очевидно, значний ефект покриттів $Mo+S$ пов'язаний зі структурно-фазовим станом модифікованих шарів.

Ключові слова: технологія, метод, електроіскрове легування, дисульфід молибдену, молибден, структура, шорсткість, мікротвердість, білий шар, дифузійна зона.

Постановка проблеми. Інтенсивний знос сполучених деталей у вузлах тертя призводить до втрати кінематичної точності механізмів, порушення герметичності робочого простору машин, порушення нормального режиму змащення і т.д.,

в результаті чого знижується працездатність вузлів тертя, зменшується продуктивність устаткування, що призводить до зниження якості продукції [1, 2].

Завдання підвищення зносостійкості і довговічності деталей тертя динамічного обладнання шляхом створення нових технологій поверхневого оброблення антифрикційних деталей, які б відповідали сучасним вимогам машинобудування та були б здатні працювати без мастила, а також

¹ Результати частково отримано в рамках науково-дослідного проекту «Розробка екологічно безпечних технологій модифікації поверхні деталей обладнання електростанцій комбінованими методами, заснованими на електроіскровому легуванні» за фінансування Міністерства освіти і науки України (держ. реєстр. № 0124U000539, Сумський державний університет).

були б недорогими, є вельми актуальним і потребує подальших досліджень.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Триботехнічні властивості пари тертя залежать від властивостей поверхонь контактуючих деталей і змащувальної речовини, що знаходиться між ними. В якості змащувальної речовини, як правило використовують мастило, яке створює між робочими поверхнями масляний шар [3]. Залежно від наявності мастильного матеріалу між робочими поверхнями деталей пари тертя, наприклад, опорною поверхнею вкладишу підшипника ковзання і поверхнею шийки валу, вони можуть працювати в умовах «сухого», змішаного (напівсухого, напіврідинного) або рідинного тертя [4].

Огляд літературних джерел показує, що в сучасному машинобудуванні найбільш широкого застосування отримали гідродинамічні підшипники завдяки простоті конструкції, хоча в період пуску, повільного прокручування і зупинки вони працюють в умовах граничного (або навіть «сухого») тертя [5].

Слід відмітити, що існують виробництва (харчове, текстильне, хімічне тощо) в яких, в зв'язку з можливістю псування продукції, між контактуючими деталями в парі тертя змазки зовсім не використовують і вони працюють в умовах тертя без мастильного матеріалу [6]. Також, тертя без мастильного матеріалу використовують з міркувань безпеки, наприклад в гальмах [6].

Покриття, нанесені на поверхні, що труться, дозволяють значно підвищити надійність машин і приладів. За допомогою покриттів можна забезпечити [7]: припрацьовуваність тертьових поверхонь і запобігання задирів; змащування в початковий момент пуску двигуна до надходження масла до поверхонь, що труться; мінімальний знос поверхонь, що труться; найнижчий коефіцієнт тертя та мінімальна зміна його в процесі роботи.

У [8] для практичного застосування запропонований спосіб обробки шийок валів, що включає нанесення м'якого антифрикційного металевого покриття з групи: індій, олово, мідь, срібло, який відрізняється тим, що покриття наноситься методом електроерозійного легування на поверхню шийки валу і підлягає подальшій обробці, наприклад, методом неабразивної ультразвукової фінішної обробки.

В якості припрацьовувальних покриттів використовують тверді змащувальні матеріали, такі як графіт, дисульфід молібдену (MoS_2), які у вигляді порошків наносять на робочі поверхні натиранням, або напилюванням.

В даний час в промисловості гостро стоїть проблема створення багатофункціональних зносостійких покриттів для важконавантажених пар тертя, що працюють в умовах високих лінійних швидкостей і доданих тисків, при недостатній кількості мастила або за повної її відсутності [9].

В останні роки проводяться роботи зі створення виробів, які можна було б використовувати без зовнішнього мастила. До цих виробів застосовують термін «самозмащувальні», оскільки при їх експлуатації не використовується зовнішнє мастило, а застосовуються в основному композиційні матеріали з дисульфідом молібдену (MoS_2). Формування та дослідження покриттів на основі дисульфиду молібдену є одним з найбільш перспективних напрямків у галузі створення твердозмащувальних покриттів.

Здатність виявляти ефект «самозмазування», тобто забезпечувати працездатність вузла тертя ковзання без введення зовнішнього мастила, є основною особливістю більшості полімерів, що використовуються у вузлах тертя. Природа ефекту «самозмазування» полімерів полягає в особливостях формується на полімерних і металевих поверхнях так званого «третього тіла», будова і склад якого є своєрідним «змащувальним» шаром, що забезпечує можливість передетормування без абразивного зношування і заїдання [10].

Відомий спосіб сульфидування, який зводиться до створення на поверхні деталі плівки сульфідів [11]. Останні підвищують поверхневу активність металів та сплавів, а також змочування поверхнево активними речовинами та опір схоплюванню. Плівка сульфиду заліза (FeS) підвищує зносостійкість поверхонь, що труться, і покращує їх припрацьовуваність. Феросульфідне покриття має досить високу пористість і вбирає велику кількість мастила, забезпечуючи матеріалу властивість самозмащування.

Традиційно сульфидування полягає у насиченні поверхневого шару металу (сталі, чавуну, сплавів титану та ін.) сіркою у відповідних соляних ваннах. Глибина сульфидованого шару досягає 50 мкм. До недоліків традиційного сульфидування, крім збільшення шорсткості поверхні та розмірів деталі, слід віднести: нагрівання всієї деталі, а відповідно і структурні зміни металу; жолоблення та деформації; велика тривалість процесу; значні витрати електроенергії; негативний вплив на екологію й інше [12].

З розробкою нових методик модифікації поверхні із застосуванням спеціальних технологічних насичуючих середовищ (СТНС) з'явилась

можливість вводити сірку й інші елементи в поверхневий шар сталених деталей методом електроіскрового легування (ЕІЛ) [13, 14]. Завдяки своїй ефективності, простоті, економічності та низькій витраті тепла технологія ЕІЛ довела свою ефективність як для покращення властивостей поверхні, таких як жаро- та зносостійкість, підвищена твердість і стійкість до корозії, так і для ремонту виробів дорогого обладнання [15].

В [16] було проілюстровано реальну можливість та доцільність використання пропонованої технології ЕІЛ із застосуванням сірки для створення MoS_2 -вмісних покриттів.

Постановка завдання. Метою роботи є удосконалення технології синтезу замозмашувальних покриттів на основі MoS_2 , отриманих енергоефективним і недорогим методом ЕІЛ, дослідження їх структури та триботехнічних властивостей.

Методика досліджень.

Електроіскрове легування здійснювали молібденовим електродом, з використанням установки «Елітрон – 52А». Режими обробки зразків зі сталі 12Х18Н10Т відповідали енергіям розряду (W_p) 0,13; 0,55 і 3,4 Дж. Тривалість обробки становила 1 хв/см².

Досліджувались дві технології сульфомолібденування.

Перша полягала у нанесенні на оброблену поверхню пасти з вмістом сірки 33,3% і легування молібденовим електродом.

Друга полягала у попередньому нанесенні на оброблену поверхню порошку дисульфиду молібдену і легування молібденовим електродом.

Після ЕІЛ визначалась шорсткість поверхні за допомогою приладу профілограф-профілометр мод. 201 заводу «Калібр» шляхом зняття і обробки профілограм.

Металографічний аналіз покриттів виконували за допомогою оптичного та сканувального електронного мікроскопів за стандартною методикою. Для дослідження розподілу елементів по глибині шару проводився локальний мікрорентгеноспектральний аналіз за допомогою сканувального електронного мікроскопу SEO-SEM Inspect S50-B, оснащеного енергодисперсійним спектрометром AZtecOne з детектором X-MaxN20 (виробник: Oxford Instruments plc). Для аналізу розподілу твердості по Віккерсу в поверхневому шарі по глибині шліфу від поверхні, використовували твердомір NOVA 330/360 (виробник INNOVATEST Europe BV, Нідерланди) відповідно до ISO 6507.

Рентгенографічні дослідження проводили в СоКа-випромінюванні на дифрактометрі

ДРОН-УМ1. Дифрактограми знімали методом покрокового сканування. Крок сканування становив 0.050, час експозиції в точці - 3 с. Обробку дифрактограм виконували за допомогою програми для повнопрофільного аналізу рентгенівських спектрів від суміші полікристалічних складових.

Трибологічні властивості формованого поверхневого шару визначали на тестері Т-01М відповідно до трибологічного стандарту DIN-50324:1992-07 «Випробування на тертя та зношування твердих тіл тертя ковзання». Схема випробування «кулька – диск» (рис. 1). Зразки, випробувані на тестері мали розмір $\varnothing 25 \times 6$ мм.

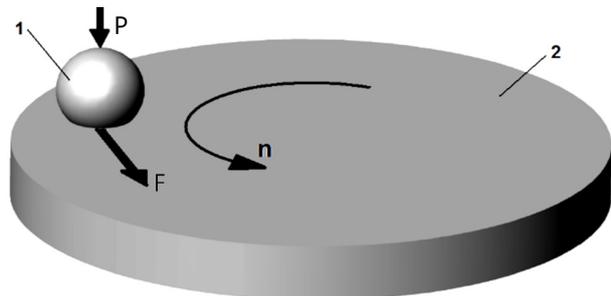


Рис. 1. Схема випробування на трибо-тестері Т-01 М: 1 – кулька з радіусом r; 2 – диск [17]

У процесі досліджень використовували такі робочі параметри тестера:

- швидкість обертання $\omega = 360$ об/хв;
- навантаження Р складало 20 і 40 Н.

У процесі випробувань визначали силу тертя F і коефіцієнт тертя μ .

В таблиці 1 представлені серії зразків для випробувань на зносостійкість. Для порівняння виготовляли зразки без обробки, після ЕІЛ молібденовим електродом і за двома пропонованими режимами обробки.

Таблиця 1

Серії зразків для триботехнічних досліджень

| № серії зразків | Матеріал кільця | Вид оброблення |
|-----------------|-----------------|---|
| 1 | 12Х18Н10Т | Без обробки |
| 2 | | ЕІЛ Мо-електродом |
| 3 | | ЕІЛ Мо-електродом із застосуванням пасти, що містить S |
| 4 | | ЕІЛ Мо-електродом із застосуванням порошку MoS_2 |

Виклад основного матеріалу дослідження.

Досліджена мікроструктура покриттів на сталі 12Х18Н10Т після ЕІЛ молібденовим електродом із застосуванням пасти, що містить сірку зве-

дені до табл. 2. Такі покриття складаються з 4-х зон: верхній пухкий шар з низькою твердістю HV 146,4-240,3, «білий» зміцнений шар з HV 651.4 для $W_p = 0,13$ Дж і HV 1137.3 для $W_p = 3,4$ Дж, дифузійна зона і основний метал.

Визначено що білі шари утворюється з рідкої фази шляхом перемішування з основою та взаємопроникною дифузією. Як правило він складається з матеріалу легуючого електрода та елементів міжелектродного середовища. Дифузійна зона утворюється в результаті дифузії хімічних елементів матеріалу анода та елементів міжелектродного середовища в матеріал катода (поверхні), а також внаслідок теплової дії. Дифузійна зона ЕІЛ покриттів плавно перетворюється на структуру основного матеріалу [16].

Білий шар розміщується світлою смужкою вздовж меж основи, нижче за яку утворюється дифузійна зона. Мікротвердість модифікованого легованого шару зменшується від поверхні і далі до матеріалу основи.

Металографічний аналіз покриттів, отриманих за технологією ЕІЛ Мо-електродом з попереднім нанесенням порошку MoS_2 на поверхню сталі 12X18H10T показав (рис. 2), що на поверхні фіксується темний шар з порошку дисульфиду молібдену, який був нанесений перед ЕІЛ та молібдену – матеріалу ЕІ. Далі розташовується зміцнений «білий» шар. Його товщина 20-30 і 50-60 мкм, твердість HV 534 і HV1127, відповідно, у зразків після ЕІЛ з енергією розряду 0,55 і 3,4 Дж (табл. 3).

Слід відмітити, що попередньо нанесений порошок дисульфиду молібдену значно покращує

процес ЕІЛ (відсутні залипання і зчеплення ЕІ з поверхнею зразка) в результаті значно знижується шорсткість сформованого шару [18] (див. табл. 3).

Електронномікроскопічні дослідження у зворотньо-розсіяних (відбитих) електронах (BSE) дозволили визначити будову і якісний розподіл елементів в покритті (рис. 3, 4). На рисунках добре виявляються зони покриття – верхній темний шар, білий зміцнений шар, дифузійна зона і основа. Зі збільшенням енергії розряду білий шар характеризується наявністю вихроподібних

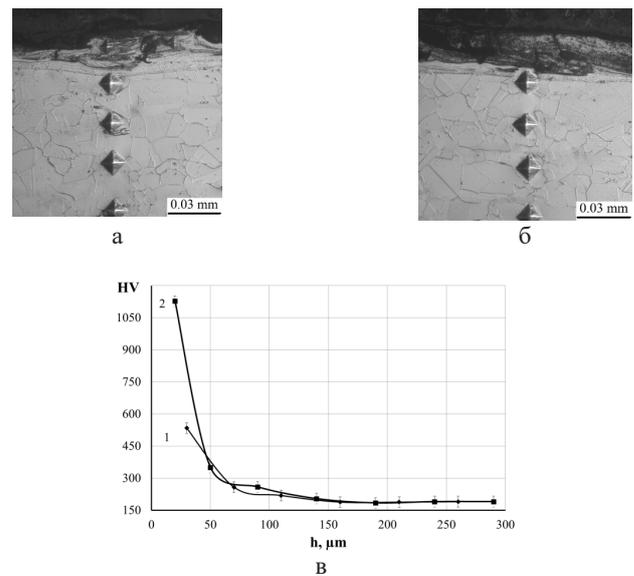


Рис. 2. Мікроструктури (а, б) і розподіл мікротвердості (в) у поверхневому шарі сталі 12X18H10T після обробки за технологією ЕІЛ Мо-електродом з попереднім нанесенням порошку MoS_2 . ЕІЛ з W_p : а – 0,55 Дж; б – 3,4 Дж; в – на графіку 1 – $W_p = 0,55$ Дж, 2 – $W_p = 3,4$ Дж

Таблиця 2

Параметри покриттів сталі 12X18H10T, отриманих за технологією ЕІЛ Мо-електродом із використанням пасти, що містить сірку

| Енергія розряду, W_p , Дж | Шорсткість, R_a , мкм | Шар зниженої мікротвердості | | Зміцнений «білий» шар | | |
|-----------------------------|-------------------------|-----------------------------|--------|-----------------------|--------|--------------------------------|
| | | HV | h, мкм | HV | h, мкм | Суцільність «білого» шару S, % |
| 0.13 | 0,9 | 146.4 | 10 | 651.4 | 20 | 80 |
| 0.55 | 2,2 | 173.2 | 15 | 882.7 | 30 | 90 |
| 3.4 | 6,2 | 240.3 | 20 | 1137.3 | 55 | До 100 |

S, % – суцільність «білого» шару

Таблиця 3

Параметри покриттів, отриманих за технологією ЕІЛ Мо-електродом з попереднім нанесенням порошку MoS_2 на поверхню сталі 12X18H10T

| Енергія розряду, W_p , Дж | Шорсткість, R_a , мкм | Зміцнений «білий» шар | | |
|-----------------------------|-------------------------|-----------------------|--------|-----------------------|
| | | HV | h, мкм | Суцільність шару S, % |
| 0.55 | 1,2 | 534 | 20-30 | 65 |
| 3.4 | 3,2 | 1127 | 50-60 | 80 |

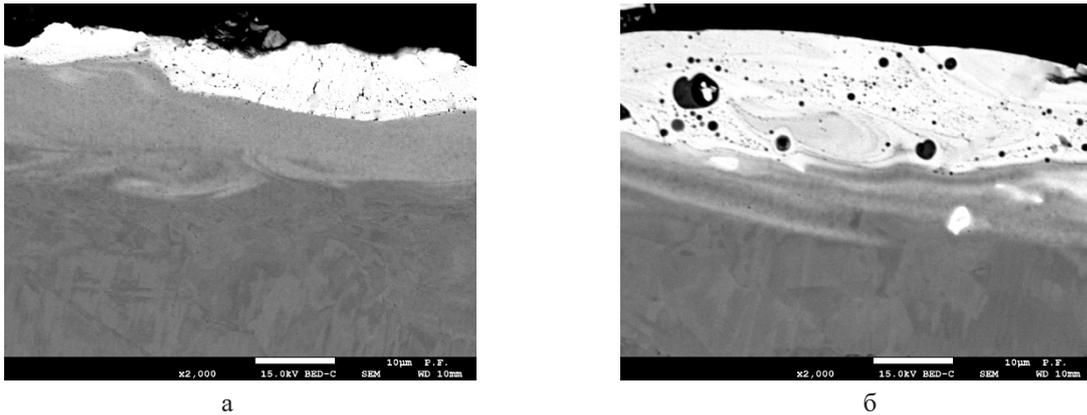


Рис. 3. Результати електронно-мікроскопічних досліджень покриттів, отриманих за технологією ЕІЛ Мо-електродом з попереднім нанесенням MoS_2 на поверхню сталі 12X18H10T ЕІЛ з енергією розряду (W_p): а – 0,55 Дж; б – 3,4 Дж

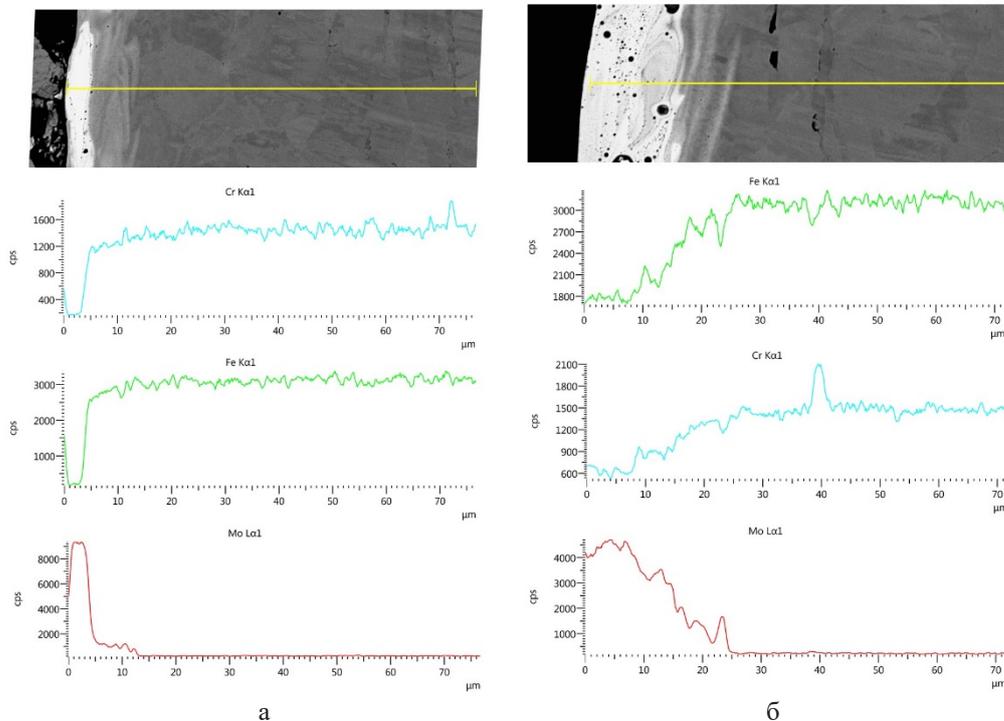


Рис. 4. Розподіл елементів покриттях, триманих за технологією ЕІЛ Мо-електродом з попереднім нанесенням MoS_2 на поверхню сталі 12X18H10T ЕІЛ з енергією розряду (W_p): а – 0,55 Дж; б – 3,4 Дж

утворень, обумовлених ефектом Марангоні-Гібса [19]. Крім того, за результатами локального рентгеноспектрального аналізу зміцнений шар насичений молібденом, кількість якого поступово зменшується від поверхні до основи (рис. 4). Отже в дифузійній зоні має місце взаємне проникнення складових елементів покриття та основи, що забезпечує високу міцність зчеплення покриття до основи.

Необхідно відмітити, що зі збільшенням енергії розряду в білому шарі збільшується кількість і змінюється форма пор. Вони розподіляються рів-

номірно і мають округлу форму. Вплив пористості на міцність і триботехнічні параметри покриттів добре описані в [20]. Як відомо [21] для ущільнюючих, припрацювальних та самозмащувальних покриттів наявність пористості є бажаним. Завдяки пористості, покриття добре втримують на робочій поверхні мастило, тому можуть працювати в умовах недостатнього мастильного забезпечення. Крім того, дисульфід молібдену є прекрасним мастилом і отримані покриття можна віднести до самозмащувальних з низькою швидкістю зносу.

Дослідження показали, що фазовий склад поверхні покриттів представлений двома твердими розчинами з ОЦК кристалічною структурою, що відрізняються періодом ґратки (рис. 5, табл. 4), ГЦК твердим розчином – аустенітом, і дисульфідом молібдену.

Необхідно відмітити, що на поверхні виявляється 26-44% MoS₂, що очевидно позитивно вплине на трибологічні властивості покриттів. Однак, зі збільшенням енергії розряду, кількість фази MoS₂ зменшується. Можливою причиною зменшення дисульфиду молібдену може бути його розпад під дією електричного розряду під час ЕІЛ.

Триботехнічні властивості покриттів

На рисунку 6 показано характер зміни сили тертя для серії зразків з покриттям Мо, Мо+S і Мо+MoS₂, які отримані методом ЕІЛ при енергії розряду 3,4 Дж на сталі 12X18H10T. Випробування проведені за умови проходження сталеву кулькою шляху тертя L=4000 м з навантаженням P=20 Н і L=1000 м з навантаженням P=40 Н. Радіус кульки r = 10 мм.

У зразків з молібденовим покриттям сила тертя з моменту початку шляху тертя до його завершення зростає від 9 до 15 Н при навантаженні P=20 Н. Крім того, зростання сили тертя супроводжується появою коливань значень при збільшенні часу випробування від 2000 с. Сила тертя, як і амплітуда коливань з моменту початку шляху тертя до його завершення, збільшується, що свідчить про появу схильності до схоплювання (рис. 6, а і б), і внаслідок чого на контактній поверхні з'явилися характерні лунки і викришування. При збільшенні навантаження до P=40 Н сила тертя F стабілізується і складає близько 20 Н. Отже, зі збільшенням сили навантаження сила тертя зростає, але при цьому стабілізується процес зношування. Коефіцієнти тертя відповідно при P=20 Н і P=40 Н відповідають значенням $\mu_{cp}=0,6469$ і $\mu_{cp}=0,4999$ (табл. 5).

Дослідження характеру зміни сили тертя серії зразків з покриттями Мо+S, в яких під час ЕІЛ утворюється дисульфід молібдену, свідчать про те, що і сила тертя, і коефіцієнт тертя в таких зразках значно менші і відповідають значенням

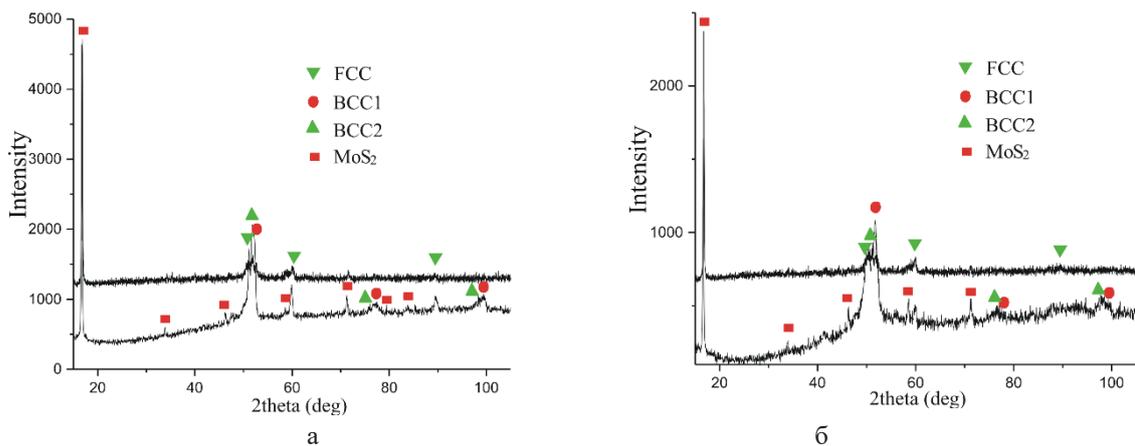


Рис. 5. Дифрактограми покриттів, отриманих за технологією ЕІЛ Мо-електродом з попереднім нанесенням MoS₂ на поверхню сталі 12X18H10T ЕІЛ з енергією розряду (W_p): а – 0,55 Дж; б – 3,4 Дж

Таблиця 4

Параметри кристалічних ґраток фаз і кількісний фазовий аналіз покриттів, отриманих за технологією ЕІЛ Мо-електродом з попереднім нанесенням MoS₂ на поверхню сталі 12X18H10T

| Енергія розряду, Дж | Фаза | Період ґраток, a, нм | Вміст фази, % (мас.) |
|---------------------|--------------------|---------------------------|----------------------|
| 0.55 | Твердий розчин ОЦК | 2.8700 | 14.3 |
| | Твердий розчин ОЦК | 2.8900 | 15.73 |
| | Твердий розчин ГЦК | 3.5900 | 25.77 |
| | MoS ₂ | a = 3.1612 c = 12.2985 | 44.2 |
| 3.4 | Твердий розчин ГЦК | 3.6500 | 24.45 |
| | Твердий розчин ГЦК | 3.5970 | 25.51 |
| | Твердий розчин ОЦК | 2.8950 | 24.02 |
| | MoS ₂ | a = 3.1612 c = 12.2985 | 26.01 |

$F_{max}=0,41$ Н і $\mu_{cp}=0,0156$ при $P=20$ Н і $F_{max}=0,43$ Н і $\mu_{cp}=0,0078$ при $P=40$ Н (табл. 5). Необхідно зазначити, що зміна сили тертя впродовж випробувань була стабільною і складала близько $\sim 0,3$ Н в обох випадках (рис. 6, в і г).

Характер зміни сили тертя із часом покриттів $Mo+MoS_2$ свідчить про стабільний процес зношування (рис. 6, д і е). Коефіцієнти тертя відповідно при $P=20$ Н і $P=40$ Н відповідають значенням $\mu_{cp}=0,0630$ і $\mu_{cp}=0,0510$ (табл. 5). Покриття $Mo+MoS_2$ сприяють значному зменшенню сили тертя та зменшенню інтенсивності зношування порівняно з молібденовими.

Отже, молібденові покриття без пасти, що містить сірку, і MoS_2 схильні до схоплювання і мають не стабільний характер зношування. Пропоновані технології ЕІЛ позитивно впливають на триботехнічні властивості поверхонь, що труться. При цьому значно зменшується середня сила тертя у 10 разів для покриття $Mo+MoS_2$, більше 40 разів для покриття $Mo+S$ при $P=20$ Н, коефіцієнти тертя

при цьому зменшуються у 10 і 40 разів, відповідно, для покриттів $Mo+MoS_2$ і $Mo+S$, а при $P=40$ Н μ зменшується у 64 рази для $Mo+S$ -покриття.

Дослідження твердості і її розподілу в модифікованих шарах показали, що покриття мають приблизно однакові параметри, HV близько 1100, товщина ~ 60 мкм (табл. 2, 3). На нашу думку, значний ефект покриттів $Mo+S$ пов'язаний зі структурно-фазовим станом, що забезпечується технологією ЕІЛ. Так, в покриттях $Mo+S$ дисульфід молібдену синтезується під час ЕІЛ [22]. Очевидно, що MoS_2 не скупчується на поверхні, порах, а рівномірно розподіляється в металевій матриці. Крім того, металографічними методами встановлено, що пористість і величина пор в одержаних покриттях не значна. В покриттях $Mo+MoS_2$, що мають більшу пористість, можливе інтенсивніше руйнування шару під дією питомих навантажень під час тертя. Однак, не зважаючи на нижчі триботехнічні показники покриття $Mo+MoS_2$, порівняно з молібденовими, показали добрі результати.

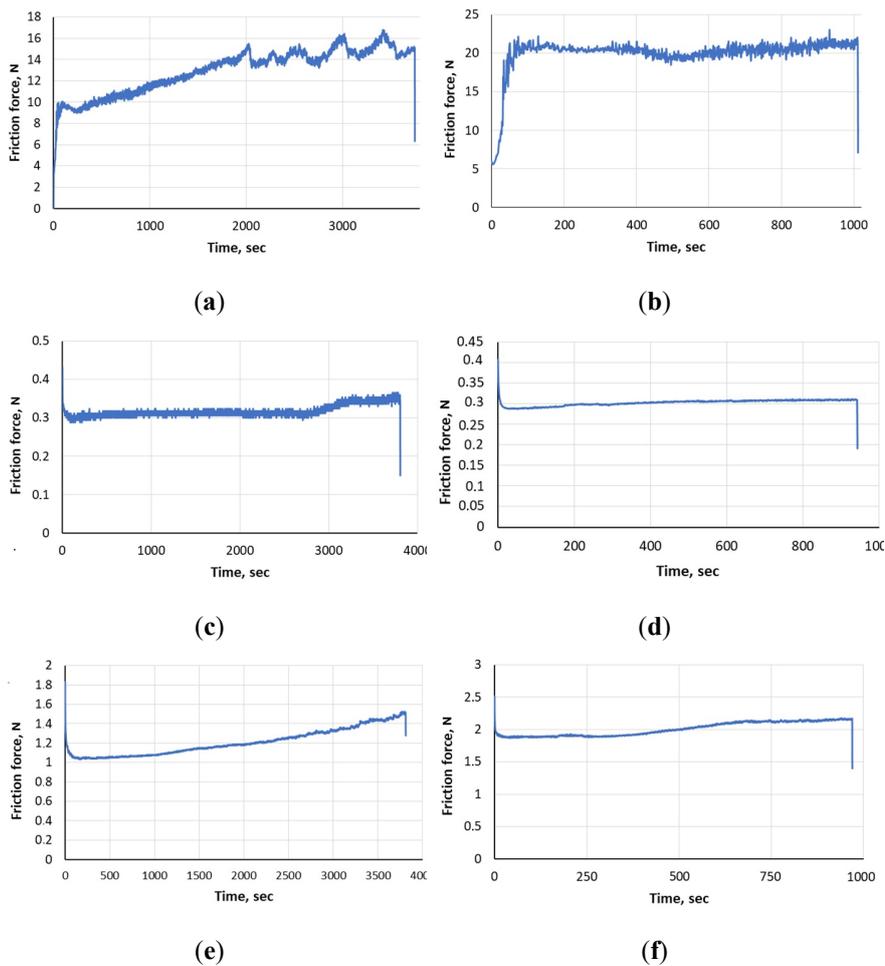


Рис. 6. Характер зміни сили тертя T (Н) сталевій кульки по поверхні випробовуваного зразка: а – покриття Mo , $P=20$ Н, б – покриття Mo , $P=40$ Н, в – покриття $Mo+S$, $P=20$ Н, г – покриття $Mo+S$, $P=40$ Н, д – покриття $Mo+MoS_2$, $P=20$ Н, е – покриття $Mo+MoS_2$, $P=40$ Н

Трибологічні властивості досліджуваних покриттів

| Серія зразків | Навантаження, Р, Н | Максимальна сила тертя, F_{max} , Н | Середнє значення сили тертя, F_{av} , Н | Середній коефіцієнт тертя, μ_{cp} |
|----------------------|-----------------------|---|---|--|
| Mo | 20 | 16,79 | 12,938 | 0,6469±0,0257 |
| | 40 | 23,06 | 19,97 | 0,4999±0,0074 |
| Mo+S | 20 | 0,41 | 0,31 | 0,0156±0,0059 |
| | 40 | 0,43 | 0,31 | 0,0078±0,0001 |
| Mo+ MoS ₂ | 20 | 1,83 | 1,20 | 0,0630±0,0001 |
| | 40 | 2,51 | 2,0 | 0,0510±0,0031 |

Висновки. Електроіскрові покриття, що містили MoS₂, були отримані за пропонованими авторами технологіями: перша полягала у нанесенні на оброблену поверхню пасти з вмістом сірки 33,3% і легування молибденовим електродом (покриття Mo+S), друга полягала у попередньому нанесенні на оброблену поверхню дисульфиду молибдену і легування молибденовим електродом (покриття Mo+MoS₂). Були досліджені структура, фізичний склад і їхні трибологічні властивості. Основні висновки, отримані в цьому дослідженні, можна підсумувати таким чином:

1. Самозмащувальні покриття, нанесені методом ЕІЛ, мають складну структуру, що складаються із верхнього пухкого не твердого шару, зміцненого білого шару, дифузійної зони і основного металу. Аналіз елементів і зміна твердості у поперечному перерізі показали, що дифузія елементів відбулася на межі між покриттям і підкладкою. Це свідчить про те, що між покриттям і підкладкою формується міцний міжатомний зв'язок.

2. Фазовий склад покриттів Mo+S при енергії розряду ЕІЛ 3,4 Дж, представлений твердими розчинами ОЦК і ГЦК, а також MoS₂, якого близько 8% на поверхні і ~5% на відстані 15 мкм від поверхні.

3. Зі збільшенням енергії розряду в білому шарі покриття Mo+MoS₂ збільшується кількість і змінюється форма пор. Вони розподіляються рівномірно і мають округлу форму. Рентгеноструктурним аналізом встановлено, що фазовий склад поверхні покриттів представлений двома твердими розчинами з ОЦК кристалічною структурою, що відрізняються періодом ґратки, ГЦК твердим розчином – аустенітом, і MoS₂. Дисульфиду молибдену виявляється 26-44% MoS₂.

4. Самозмащувальні покриття демонструють дуже хороші трибологічні властивості порівняно з молибденовими ЕІЛ покриттями. Значно зменшується сила тертя у 10 разів для покриття Mo+MoS₂, більше 40 разів для покриття Mo+S при P =20 Н, коефіцієнти тертя при цьому зменшуються у 10 і 40 разів, відповідно, для покриттів Mo+MoS₂ і Mo+S, а при P =40 Н μ зменшується у 64 рази для Mo+S-покриття. Дослідження твердості і її розподілу в модифікованих шарах показали, що покриття мають приблизно однакові параметри, HV близько 1100, товщину ~60 мкм. Очевидно, значний ефект покриттів Mo+S пов'язаний зі структурно-фазовим станом модифікованих шарів.

Список літератури:

1. Roik T.A., Gavrysh O.A., Vitsiuk Iu.Iu., Kholiavko V.V. Wear-Resistant Composites Produced from Tool Steel Waste for Contact Joints of High-Speed Printing Machines. *Powder Metallurgy and Metal Ceramics*, Vol. 62, no 3-4, P. 215 – 224. URL: DOI:10.1007/s11106-023-00385-2
2. Чернець М. В., Пашечко М. І., Невчас А. Методи прогнозування та підвищення зносостійкості триботехнічних систем ковзання. 3т. – Дрогобич, Коло, 2001. — 512 с. Журавель Д. П. Триботехніка. Курс лекцій з навчальної дисципліни. Мелітополь: ВПЦ «Люкс», 2019. 280 с.
3. Martsinkovsky, V., Yurko, V., Tarelnik, V., Filonenko, Y. Designing radial sliding bearing equipped with hydrostatically suspended pads. *Procedia Engineering*. 2012. 39. P 157-167. URL: <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2012.07.020>
4. Антипенко А.М., Белас О.М., Войтов В.А., Вотченко О.С. Основи трибології. Харків: ХНТУСГ, 2008. 342 с.
5. Martsinkovsky, V., Yurko, V., Tarelnik, V., Filonenko, Y. Designing thrust sliding bearings of high bearing capacity. *Procedia Engineering*. 2012. 39, P. 148-156. URL: <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2012.07.019>
6. Колесніков В.О. Конспект лекцій з дисципліни Триботехніка. Частина І», для здобувачів вищої освіти першого (бакалаврського) та другого (магістерського) рівня денної та заочної форм навчання спеціальності 015.38 «Професійна освіта» освітньої-професійної програми «Транспорт». Полтава: Вид-во ДЗ «ЛНУ імені Тараса Шевченка», 2023. 132 с.
7. Tarelnik V.B., Paustovskii A.V., Tkachenko Y.G., Martsinkovskii V.S., Konoplyanchenko E.V., Antoshevskii K. Electric-spark coatings on a steel base and contact surface for optimizing the working characteristics of babbitt friction bearings. *Surface Engineering and Applied Electrochemistry*. 2017. 53 (3), P. 285-294. URL: <https://doi.org/10.3103/S1068375517030140>

8. Tarelnyk V., Martsynkovskyy V., Dziuba A. New method of friction assemblies reliability and endurance improvement. *Applied Mechanics and Materials*. 2014. 630, P. 388-396. URL: <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.630.388>
9. Shipway P.H., McCartney D.G., Sudaprasert T. Sliding wear behaviour of conventional and nanostructured HVOF sprayed WC-Co coatings. *Wear*. 2005. Vol. 259. P. 820-827.
10. Tarelnyk V.B., Martsynkovskii V.S., Zhukov A.N. Increase in the Reliability and Durability of Metal Impulse End Seals. Part 1. *Chemical Petroleum Engineering*. 2017. Vol. 53, No 1–2. P. 114–120. URL: <https://doi.org/10.1007/s10556-017-0305-y>
11. Tarelnyk V., Martsynkovskyy V., Gaponova O., Tarelnyk N., Gorovoy S. New sulphiding method for steel and cast iron parts. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2017, 233(1), 012049 URL: DOI: 10.1088/1757-899X/233/1/012049
12. Спосіб сульфидування поверхні сталевих і чавунних деталей методом електроерозійного легування / Тарельник В. Б., Марцинковський В. С., Білоус А. В., Жуков О. М., Косенко П. В., Гапонова О. П.: пат. 117528 UA, МПК В23Н 1/04 (2006.01), С23С 8/60 (2006.01); заявл. 24.11.2016 ; опубл. 10.08.18, Бюл. № 15, 2018.
13. Спосіб сульфоцементатії поверхні сталевих деталей / Тарельник В. Б., Марцинковський В. С., Білоус А. В., Жуков О. М., Гапонова О. П., Коноплянченко Є. В.: пат. 117867 UA, МПК В23Н 1/00, В23Н 9/02 (2006.01), С23С 8/64 (2006.01), В23Н 5/02 (2006.01), С23С 8/66 (2006.01); заявл. 22.12.2016 ; опубл. 10.10.2018, Бюл. № 19, 2018.
14. Спосіб сульфоцементатії сталевих деталей / Тарельник В. Б., Марцинковський В. С., Гапонова О. П., Коноплянченко Є. В., Тарельник Н. В., Думанчук М. Ю., Гончаренко М. В., Антошевський Б., Кундера Ч.: пат. на корисну модель 130866 UA, МПК В23Н 1/00, В23Н 9/00, С23С 10/48 (2006.01), С23С 8/60 (2006.01); заявл. 06.07.2018 ; опубл. 26.12.2018, Бюл. № 24, 2018.
15. Barile C., Casavola C., Pappaletta G., Renna G. Advancements in Electrospark Deposition (ESD) Technique: A Short Review. *Coatings*. 2022, 12, 1536. URL: <https://doi.org/10.3390/coatings12101536>
16. Gaponova O.P., Antoszewski B., Tarelnyk V.B., Kurp P., Myslyvchenko, O.M., Tarelnyk N.V. Analysis of the Quality of Sulfomolybdenum Coatings Obtained by Electrospark Alloying Methods. *Materials*. 2021, 14, 6332. URL: <https://doi.org/10.3390/ma14216332>
17. Yue M., Zhao W., Wang S., Li J., Zhu C., Jin H., Guo C. Tribological properties of electrospark depositing Ni-WS2 self-lubricating coating. *Chalcogenide Letters*. 2021. 18(10), P. 557. URL: <https://doi.org/10.15251/CL.2021.1810.557>
18. Спосіб усунення зчеплення електродів при електроіскровому легуванні сталевих деталей обладнання, яке підлягає радіаційному опромінюванню: пат. 155134 України на корисну модель, МПК (2024.01) В23Р 6/00 / Тарельник Н.В. - у 2023 04455 (22); опубл. 17.01.2024, Бюл. № 3.
19. Wang J.M., Liu G.H., Fang Y.L., Li W.K Marangoni effect in nonequilibrium multiphase system of material processing. *Rev. Chem. Eng.* 2016. Vol. 32. P. 551 – 585. URL: DOI:10.1515/revce-2015-0067
20. Tuo Y., Yang Z., Guo Z., Chen Y., Hao J., Zhao Q., Kang Y., Zhang Y., Zhao Y. Pore structure optimization of MoS₂/Al₂O₃ self-lubricating ceramic coating for improving corrosion resistance. *Vacuum*. 2023, 207, 111687. <https://doi.org/10.1016/j.vacuum.2022.111687>
21. Borysov Yu.S., Vihilianska N.V., Burlachenko O.M., Olevska L.P., Lopata V.M. Analysis of modern experience in development of sealing coatings for parts of gas turbine engines (Review). *Automatic Welding*. 2022, Vol. 4, P. 41-49. URL: DOI: <https://doi.org/10.37434/as2022.04.06> (in Ukraine)
22. Gaponova O.P., Antoszewski B., Tarelnyk V.B., Kurp P., Myslyvchenko O.M., Tarelnyk N.V. Analysis of the Quality of Sulfomolybdenum Coatings Obtained by Electrospark Alloying Methods. *Materials*. 2021, 14, 6332. URL: <https://doi.org/10.3390/ma14216332>

Gaponova O.P., Tarelnyk N.V. RESEARCH OF STRUCTURE AND TRIBOLOGICAL PROPERTIES OF MoS₂ COATINGS OBTAINED BY ELECTRO-SPARK ALLOYING METHOD

The paper focuses on MoS₂ electrospark coatings obtained by the technologies proposed by the authors: the first one consisted in applying a paste with a sulphur content of 33.3% on the treated surface and alloying it with a molybdenum electrode (Mo+S coating), and the second one consisted in pre-applying molybdenum disulfide on the treated surface and alloying it with a molybdenum electrode (Mo+MoS₂ coating). The results of the structure, phase composition and tribological properties studies are presented. It is found that self-lubricating coatings applied by electric spark alloying (ESA) have a complex structure consisting of an upper loose non-solid layer, a hardened white layer, a diffusion zone and a substrate metal. Analysis of the composition and changes in cross-sectional hardness showed that the diffusion of elements occurred at the interface between the coating and the substrate. This indicates that a strong interatomic bond is formed between the coating and the substrate. The phase composition of Mo+S coatings at the ESA discharge energy of 3.4 J is represented by solid bcc and fcc solutions, as well as MoS₂, the availability of which is about 8% on the surface and ~5% at a distance of 15 μm from the surface. While increasing the discharge energy in the white layer of the Mo+MoS₂ coating, the number and the shape of the pores have been increasing. They are distributed evenly and have a rounded shape. The X-ray structural analysis has stated that the phase composition of the coating surface is represented by two solid solutions having bcc crystal structures, which differ in the lattice periods, an fcc solid solution, namely, austenite, and MoS₂. The molybdenum disulfide content is 26-44%. The self-lubricating coatings demonstrate very good tribological properties as compared to the molybdenum ESA coatings. The friction force has been significantly reduced: by 10 times - for the Mo+ MoS₂ coatings, more than 40 times - for the Mo+S coatings at P =20 N. The friction coefficients have been reduced by 10 and 40 times, respectively, for the Mo+MoS₂ and Mo+S coatings; and at P =40 N, μ has been reduced by 64 times for Mo+S-coatings. The investigations of hardness and its distribution in the modified layers have shown that the coatings have approximately the same parameters, the HV values of about 1100, the thickness of about 60 μm. Obviously, the significant effect of Mo+S coatings would be related to the structural and phase states of the modified layers.

Key words: technology, method, electrospark alloying, molybdenum disulfide, molybdenum, structure, roughness, microhardness, white layer, diffusion zone.

ПРИЛАДИ

УДК 535.232

DOI <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2024.4/04>

Романюк В.А.

Національна академія Національної гвардії України

Стародубцев С.О.

Національна академія Національної гвардії України

ОЦІНКА ВПЛИВУ ТЕПЛОФІЗИЧНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ МАТЕРІАЛУ ОБШИВКИ БЕЗПЛОТНИХ ЛІТАЛЬНИХ АПАРАТІВ НА ЕФЕКТИВНІСТЬ ЛАЗЕРНИХ ЗАСОБІВ УРАЖЕННЯ

Стаття присвячена дослідженню впливу лазерного випромінювання на матеріал обшивки корпусів літальних апаратів і можливістю його застосування як засобу ураження повітряних цілей.

Визначено, що традиційні системи озброєнь, які застосовуються при веденні бойових дій, на поточний час все частіше виявляються менш ефективними, особливо в боротьбі з безпілотними літальними об'єктами. Через це фахівці звернули увагу на можливість використання бойових лазерів як засобу ураження. Який же сучасний стан і перспективи створення ефективних зразків лазерної зброї, що використовує як вражаючий засіб потужний промінь проміння, її сильні та слабкі сторони?

З урахуванням необхідності протидії новим видам загроз, виникає питання, чи можуть квантово-оптичні засоби замінити традиційні види озброєнь і коли це може статися? Важко сказати. Але, враховуючи, як розвивається цей напрям, можна говорити про реальні досягнення в розробці лазерної зброї.

Перевагами лазерної зброї у порівнянні з звичайними зразками озброєння є невеликі витрати для ураження об'єктів, швидкість ураження (зі швидкістю світла), необмежена кількість пострілів, завдяки своїй швидкості та системам спостереження за цілями може вражати багато цілей одночасно, при сприятливих погодних умовах, може досягати дуже великих відстаней. Щодо недоліків даного виду зброї, потребують багато енергії, оскільки засоби виділяють багато тепла під час використання, потрібне додаткове охолодження, стрільба тільки по прямій, сильна залежність від стану атмосфери.

Лазерна зброя безпосереднього руйнування дозволяє порушити цілісність конструкції літального апарату, ініціювати його вибух або інтенсивне горіння вибухових або легкозаймистих речовин, що знаходяться на об'єкті. Лазерне випромінювання виробляється в рамках упорядкованого процесу примусової емісії. Лазер випромінює когерентне монохроматичне світло у вигляді паралельного пучка спрямованої енергії, поширюється зі швидкістю світла, що у десятки тисяч разів перевищує швидкість сучасних ракет. Це вказує на те, що альтернативи розвитку бойових лазерів немає.

Ключові слова: лазерна зброя, ураження об'єктів, лазерний промінь.

Постановка проблеми. При розробці любого виду зброї, в тому числі і лазерної, основною вимогою до неї є визначення її ефективності. А від того, наскільки вона буде ефективною, буде залежати і питання, чи взагалі є необхідність у створення такої зброї. Коли мова йде про зброю, основою якої є квантово-оптичні засоби (лазери), то під ефективністю розуміють величину енергії, яку може генерувати такий пристрій. А енергія випромінювання безпосередньо впливає на масо-габаритні характеристики (для збільшення енергії випромінювання необхідно потужніший, а зна-

чить і більший накопичувач, активний елемент тощо) [2, с. 2].

Як відомо, при дії лазерного випромінювання великої потужності на матеріали виникає плазмовий шар і фактично необхідно аналізувати взаємодію випромінювання із плазмою, що утворилася на поверхні об'єкта. Падаючий на поверхню матеріалу потік енергії частково відбивається, інша частина потоку, яка проникає в глибоку речовину, поглинається. Це веде до нагрівання й руйнування речовини за рахунок дії ефективного теплового джерела з визначеним просторово – часовим

розподілом [2, с. 5–6]. Дослідження показують [2, с. 11–12], що при заданій формі й тривалості імпульсу існує досить чітко визначена критична щільність потоку випромінювання (яка залежить від теплофізичних характеристик речовини, що опромінюється). При цьому передбачається, що як властивості падаючого потоку лазерного випромінювання, так і теплофізичні характеристики самої речовини відомі. Але часто доводиться вводити потік електромагнітної енергії в середовище при відсутності інформації про її теплофізичні властивості. У цьому випадку неможливо визначити оптимальне введення електромагнітної енергії в речовину, при якій відбувається інтенсивний випар речовини. Звідси й необґрунтовані енергетичні витрати при впливі лазерного випромінювання на речовину і величезні витрати енергії при захисті її від лазерної енергії. Отже, знання теплофізичних характеристик речовини, що взаємодіє з лазерним випромінюванням, є необхідною умовою пропалювання її лазерним променем.

Зі зростанням щільності потоку лазерного випромінювання поверхня металу нагрівається до усе більш високої температури. У результаті починається плавлення й випар металу. При досягненні цієї щільності відбувається інтенсивний випар речовини, котрий призводить, крім плавлення, й до руйнування речовини.

Наявність інформації про теплофізичні характеристики матеріалу обшивки дронів, які використовуються на полі бою, енергетичні характеристики наявних лазерних засобів дає можливість розташовувати їх на оптимальній відстані від лінії бойового зіткнення.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Питанню застосування зброї направленої енергії присвячено досить багато публікацій [1, 2, 4, 5, 6]. До одних з довготривалих розробок щодо знищення крилатих ракет, в тому числі і БПЛА можна віднести лазерну зброю. В якості вражаючого елемента є лазерний промінь. Прототипи лазерної зброї розробляються різними державами і компаніями з 70-80-х років ХХ століття [4, с. 19].

Лазерна антидронна зброя фокусує і стріляє лазерним променем, який знищує безпілотник зсередини, нейтралізуючи його. Лазерна зброя дозволяє порушити конструкцію літального апарату і визвати підриг його паливних баків або речовин, які знаходяться всередині апарату: бойовий заряд, легкозаймисті речовини тощо [2, с. 3]. Такі пристрої розробляють компанії Lockheed Martin та Raytheon. Також відомо про спільні розробки Lockheed Martin і Rafael (Ізраїль). Компа-

нії об'єднали зусилля, щоб створити антидронну оптичну (лазерну) зброю для посилення системи ППО. Лазерна зброя є й у Китаю. Її виготовляє компанія China Space Sanjiang Group [5, с. 2].

Досягнення з розробки лазерної зброї, описані в вищезазначених джерелах, це все лише одиничні зразки. Застосування лазерної зброї в реальних бойових діях поки що ніде не зафіксовано. До прикладу, у Британії планують взяти на озброєння лазерну зброю DragonFire до 2027 року. Ця лазерна зброя була створена для знищення безпілотників, однак, система достатньо потужна, щоб уражати швидші снаряди, наприклад балістичні ракети [6, с. 2].

США – лідер у галузі розробки лазерної зброї. Тут вона розвивається так інтенсивно, як ніде у світі. У 2017 році провідна аерокосмічна та оборонна американська корпорація Lockheed Martin продемонструвала свою лазерну систему ATHENA. Ця переносна наземна система складається з трьох оптоволоконних лазерів потужністю від 10 до 30 кіловат. Її мета – боротьба з малими безпілотниками, у чому вона себе успішно зарекомендувала.

Крім того, армія США у вересні 2023 року також взяла на озброєння систему DE M-SHORAD від компанії Leonardo DRS. Це прототипи ближньої дії, оснащені 50-кіловатними лазерами і встановлені на броньованих машинах Stryker. Крім бойового лазера, включає також радар, систему управління променем і систему наведення [7, с. 9–11].

Постановка завдання. Метою роботи є оцінка залежності впливу вражаючого променя лазерних засобів протидії безпілотним літальним апаратам на їх обшивку від теплофізичних властивостей матеріалу, з якого виготовлений корпус дрона, що дає можливість визначити оптимальне місце розташування засобів ураження на полі бою.

Виклад основного матеріалу. Більшість застосувань лазерів засновано на тепловій дії світла. Фізична модель впливу лазерного променя проявляється в наступних процесах:

- поглинання лазерного випромінювання;
- нагрівання металу до точки плавлення $T_{пл}$;
- плавлення після поглинання питомої теплоти плавлення $L_{пл}$;
- нагрів до точки випарювання (кипіння) $T_v = T_b, P = P_{атм}$;
- випарювання після поглинання питомої теплоти пароутворення $L_{вип}$;
- рух поверхні, яка випаровується в глибину матеріалу зі швидкістю V_0 ;
- утворення плазми [8, с. 4–5].

Проведемо аналіз динаміки нагрівання речовини лазерним випромінюванням та визначимо основні теплофізичні параметри речовини.

Промінь, який направляється на поверхню дрона, проникає в нього, при цьому частина енергії відбивається, частина поглинається всередину обшивки фюзеляжа дрона. Глибина проникнення залежить від багатьох параметрів: оптичних властивостей матеріалу фюзеляжа, від стану його поверхні, від довжини хвилі, тривалості імпульсу та енергії випромінювання, що супроводжується його нагріванням і частковим випаровуванням.

Таким чином, щоб пропалити обшивку дрона, необхідно забезпечити потужний тепловий вплив лазерного випромінювання на поверхню літального апарату. При цьому необхідно перевищити порогове значення щільності енергії в місці влучення променя на поверхні, за рахунок чого почнеться процес інтенсивного випаровування матеріалу. Глибина проникнення променя в матеріал обшивки збільшується при зменшенні тривалості імпульсу і збільшенні частоти лазерного випромінювання.

Критерій застосування лазерів для пропалювання матеріалу, з якого виготовлена обшивка літального апарату, що здатні нагріти поверхню до заданої температури T .

Температура поверхні T залежить від потужності P лазера, яка поглинається площею S : $q=P/S$, де q щільність потужності, $P=W/\tau$, W енергія в імпульсі, τ – тривалість імпульсу впливу.

Співвідношення між T і q щільністю потужності може бути визначено з рівняння теплопровідності:

$$\frac{dT}{dt} - \alpha \Delta T = \frac{Q(x, y, z, t)}{\rho c} \quad (1)$$

де:

Δ – оператор Лапласа, $\Delta = \frac{d^2T}{dx^2} + \frac{d^2T}{dy^2} + \frac{d^2T}{dz^2}$;

Q – об’ємна щільність світлового потоку, який поглинається;

a – температуропровідність;

ρ – щільність;

c – теплоємність.

Для металів вирішення рівняння (1) для круглого джерела випромінювання – круглої плями з радіусом r_0 буде:

$$T = \frac{2q_0(1-R)\sqrt{\alpha\tau}}{k} \left(\frac{1}{\sqrt{\pi}} - \operatorname{ierfc} \frac{r_0}{2\sqrt{\alpha\tau}} \right) + T_n \quad (2)$$

Для

$$r_0 \gg \sqrt{\alpha\tau}$$

при імпульсному режимі

$$T = \frac{2q_0(1-R)\sqrt{\alpha\tau}}{k\sqrt{\pi}} + T_n \quad (3)$$

Формула (3) дозволяє розрахувати порогову (критичну) щільність потужності $q^{\text{пор}}$, необхідну для нагрівання поверхні до заданої температури.

Поглинання на поверхні не розподілене рівномірно, і місця з відносно малим поглинанням чергуються з центрами повного поглинання. Для розвитку випаровування важливі саме такі центри, а не середній по поверхні коефіцієнт поглинання матеріалу. Тепловий вплив лазерного випромінювання краще проявляється в імпульсному режимі роботи квантового генератора. При цьому за час дії імпульсу лазерного променя відбувається викид струменя пари в напрямку, перпендикулярному до площини поверхні об’єкта.

Пороги випарювання для імпульсної дії ($\text{Вт}/\text{см}^2$) представлені в таблиці 1.

Таблиця 1

| Тривалість імпульсу | Al | Cu | W | Fe |
|------------------------|---------------------|---------------------|-------------------|---------------------|
| | q_v | q_v | q_v | q_v |
| $\tau=10^{-3}\text{с}$ | $2.4 \cdot 10^{10}$ | $2.9 \cdot 10^{10}$ | $1 \cdot 10^{10}$ | $3.6 \cdot 10^9$ |
| $\tau=10^{-7}\text{с}$ | $2.4 \cdot 10^{12}$ | $2.4 \cdot 10^{12}$ | $1 \cdot 10^{12}$ | $3.6 \cdot 10^{11}$ |

Поглинання речовиною лазерної енергії призводить до збільшення температури речовини на величину $T(r, z, t)$ [8, с. 5–8].

Уведемо характерні величини, пов’язані з теплофізичними константами середовища k_t , c і ρg ($g = 9,80665 \text{ м/с}$):

характерна довжина

$$l_0 = \sqrt[3]{\frac{1(k_t)^2}{g(c\rho)^2}} \quad (4);$$

характерний час

$$t_0 = \sqrt[3]{\frac{k_t}{c\rho g^2}} \quad (5);$$

характерна швидкість

$$v_0 = \frac{l_0}{t_0} = \sqrt[3]{\frac{k_t g}{c\rho}} \quad (6);$$

характерна маса

$$m_0 = \rho l_0^3 = \frac{1}{\rho g} \left(\frac{k_t}{c} \right)^2 \quad (7);$$

характерна енергія

$$\varpi_0 = \frac{m_0 v_0^2}{2} = \frac{1}{2\rho} \left(\frac{k_t}{c} \right)^2 \sqrt[3]{\frac{1}{g} \left(\frac{k_t}{\rho c} \right)^2} \quad (8);$$

характерна температура

$$T_0 = \frac{\varpi_0}{c\rho l_0^3} = \frac{1}{2c} \sqrt[3]{\left(\frac{k_t g}{c\rho} \right)^2} \quad (9).$$

Теплофізичні характеристики c , ρ , і k_t взято з [9, с. 185–192], а значення введених характерних величин розраховуються за формулами (4–9).

Для металів $\alpha l_0 \gg 1$, тому інтеграл

$$I = \int_0^{\infty} d\xi_0 \cdot e^{-\alpha l_0 \xi_0} \cdot e^{-\frac{\xi_0^2}{4(\tau-\tau_0)}}$$

можна обчислити асимптотично $I \sim \frac{1}{\alpha l_0}$, тоді для приросту температури в центрі лазерної плями на поверхні досліджуваної речовини, будемо мати

$$T(0, 0, \tau) \approx \frac{I_0 l_0}{2\sqrt{\pi} k_\tau} \int_0^{\tau} \frac{d\tau_0}{\sqrt{\tau - \tau_0}} \phi(\tau_0) \left(1 - e^{-\frac{a_{01}^2}{4(\tau-\tau_0)}} \right). \quad (10)$$

Вираз в круглих дужках рівняння (10) дає внесок в інтеграл або при виключно малих радіусах лазерного пучка, або при великих інтервалах часу, тобто при $a_{01}^2 \sim 4(\tau - \tau_0)$, тому

$$T(0, 0, \tau) \cong \frac{I_0 l_0}{2\sqrt{\pi} k_\tau} \int_0^{\tau} \frac{d\tau_0}{\sqrt{\tau - \tau_0}} \phi(\tau_0) = \frac{I_0 l_0}{2\sqrt{\pi} k_\tau} f(\tau). \quad (11)$$

Вираз (11) використовується для обчислення тимчасової зміни температури досліджуваної речовини на осі лазерного пучка. Отримана інформація важлива для визначення параметрів захисних покриттів, що відбивають або поглинають лазерне випромінювання.

Лазерний «пічок» з гарною для практики точністю можна проксимувати модельною залежністю (12), приведеною на рисунку 1.

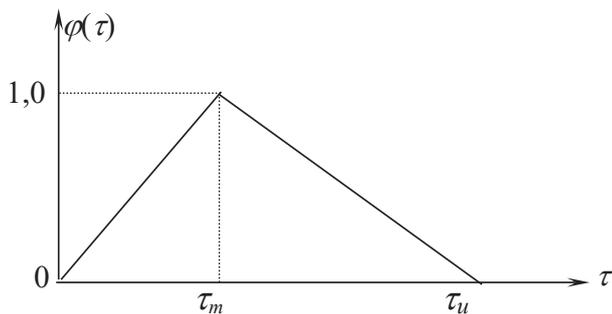


Рис. 1. Модельна залежність лазерного «пічка»

$$\phi(t) = \begin{cases} \frac{1}{\tau_m} \tau; & 0 \leq \tau \leq \tau_m; \\ \frac{\tau_u - \tau}{\tau_u - \tau_m}; & \tau_m \leq \tau \leq \tau_u; \\ 0; & \tau \geq \tau_u. \end{cases} \quad (12)$$

У цьому випадку

$$f(\tau) = \int_0^{\tau} \frac{dx \phi(x)}{\sqrt{\tau-x}} = \frac{4}{3} \int_0^{\tau} (\tau-x)^{\frac{3}{2}} \phi'(x) dx = \frac{4}{3} \begin{cases} \frac{\tau^{\frac{3}{2}}}{\tau_m}, & 0 \leq \tau \leq \tau_m; \\ \frac{\tau^{\frac{3}{2}}}{\tau_m} - \frac{\tau_u}{\tau_m} \frac{(\tau - \tau_m)^{\frac{3}{2}}}{\tau - \tau_m}, & \tau_m \leq \tau \leq \tau_u; \\ \frac{\tau^{\frac{3}{2}}}{\tau_m} - \frac{\tau_u}{\tau_m} \frac{(\tau - \tau_u)^{\frac{3}{2}}}{\tau - \tau_u} + \frac{(\tau - \tau_m)^{\frac{3}{2}}}{\tau - \tau_m}, & \tau \geq \tau_u \end{cases} \quad (13)$$

З виразу (13) видно, що $f(\infty) = 0$, як і слід було очікувати. Максимальна температура досягається

при $\tau = \tau_0$, причому $\tau_m < \tau_0 < \tau_u$. Аналіз виразу (13) показує, що

$$\tau_0 = \frac{\beta^2}{\beta^2 - 1} \tau_m, \quad (14)$$

де $\beta = \frac{\tau_u}{\tau_u - \tau_m}$ ($\beta \in [1, \infty)$).

При цьому відносно запізнювання максимуму температури відносно максимуму лазерного «пічка» дорівнює:

$$\delta\tau \stackrel{def}{=} \frac{\tau_0 - \tau_m}{\tau_u} \cong \frac{1}{\beta(\beta + 1)} \quad (15)$$

Свого максимального значення $\delta\tau$ досягає при імпульсу, у якого $\beta = 1$ ($\tau_m = 0$) при цьому $\delta\tau = 1/2$. При $\beta = \infty$, $\delta\tau = 0$.

Підставляючи τ_0 в (13), одержимо $f(\tau_0)$ у вигляді:

$$f(\tau_0) = \frac{4}{3} \sqrt{\frac{\beta\tau_u}{\beta+1}}, \quad (16)$$

Причому

$$f(\tau_0) /_{\beta=1} = \frac{4}{3} \sqrt{\frac{\tau_u}{2}},$$

$$f(\tau_0) /_{\beta=\infty} = \frac{4}{3} \sqrt{\tau_u}.$$

На рисунку 2 показаний вигляд імпульсів при $\beta = 1$ та $\beta = \infty$ [10, с. 59–70].

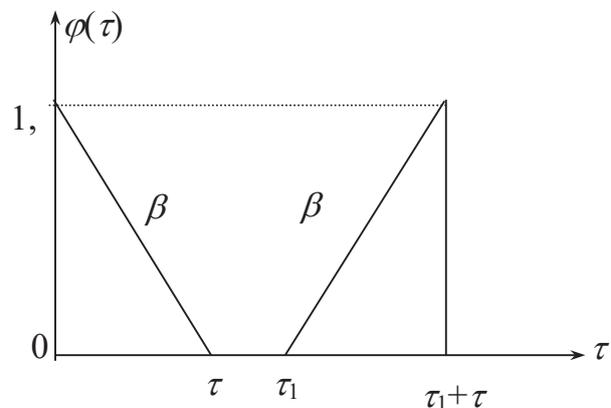


Рис. 2. Вигляд імпульсу лазера при $\beta = 1$ та $\beta = \infty$

При цьому необхідно враховувати різні види імпульсів лазера, так при лазерному нагріванні речовини варто використовувати імпульси з $\beta = \infty$, оскільки при цьому досягається температура в $\sqrt{2}$ раз більша, ніж у випадку $\beta = 1$ при фіксованій енергії імпульсу лазера.

При відомих теплофізичних властивостях матеріалу, з якого виготовлений дрон (порогова шільність потужності $q_{в}$, за якої відбувається випарювання матеріалу), технічних характеристиках лазерного засобу ураження (потужність випромі-

нювання R , характеристиках імпульсу впливу τ і β , діаметр апертури передавача D , довжини хвилі випромінювання λ , діаметр променя на об'єкті ураження d), відстань R між об'єктом і місцем розташування засобом ураження можна оцінити за виразом:

$$d = \frac{\lambda}{D} R. \quad (17)$$

Висновки. Таким чином, при наявних потужностях лазерних засобів ураження, теплофізичних

властивостей матеріалу обшивки дрона, умов розповсюдження лазерного променя, можна розрахувати максимальну відстань розміщення лазерних засобів ураження від лінії зіткнення, при якій літальний апарат буде уражений з високою ймовірністю.

Знання теплофізичних властивостей речовини є необхідною умовою для ефективного використання впливу лазерного випромінювання різної форми імпульсу та тривалості.

Список літератури:

1. Романюк В.А., С.О. Стародубцев. Дослідження ефективності лазерних методів виявлення безпілотних літальних апаратів. *Вчені записки ТНУ імені В.І. Вернадського. Серія: Технічні науки*. 2023. № 5. Том 34 (73). С. 22–26.
2. Ростопчин В.В. Лазерні комплекси та системи, особливості застосування і оцінка перспектив. *SDT Industrial Technology, Ottobrunn, Germany*. С. 1–26.
3. Володимир Заблоцький. Бойові лазери як світовий тренд в розробках зброї нового покоління. URL: <http://opk.com.ua/> (дата звернення: 23.03.2024).
4. Р.В. Корольов, Н.О. Королюк, О.В. Петров, К.В. Сюлев. Аналіз сучасних засобів знищення безпілотних літальних апаратів. *Збройна боротьба: теорія, забезпечення, досвід. Збірник наукових праць ХНУПС*. 2017. Том 4(53). С. 17–21.
5. Зброя проти дронів. Топ 8 технологій, які здатні знищити БПЛА ворога. URL: <https://focus.ua/uk/digital/549552-top-8-vidov-oruzhiya-protiv-dronov-i-bpla-okkupantov/> (дата звернення: 12.04.2024).
6. У Британії вперше випробували лазерну зброю для збиття повітряних цілей. URL: <https://www.volynnews.com/news/all/u-brytaniyi-vpershe-vyprobuvaly-lazernu-zbroiu-dlia-zbytta-povitrianykh-tsil/> (дата звернення: 28.03.2024).
7. Роман Тищенко. Збивати ракети лазером більше не фантастика: як це змінить поле бою. URL: <https://www.liga.net/ua/world/articles/odyn-postril-do-5-zbyvaty-rakety-lazerom-bilshe-ne-fantastyka-iaak-tse-zminyt-pole-boiu/> (дата звернення: 16.04.2024).
8. Вейко В.П. Технологічні лазери і лазерне випромінювання. Видання 2-е, виправлене і доповн. СПбДУ, 2007. 52 с.
9. Таблиці фізичних величин. Під ред. І. К Кікоїна. М.: 1978. 1008 с.
10. Реді Дж. Дія потужного лазерного випромінювання. Пер. с англ. М.: 1984. 470 с.

Romanyuk V.A., Starodubtsev S.O. ASSESSMENT OF THE INFLUENCE OF THERMOPHYSICAL PROPERTIES OF THE COVERING MATERIAL OF UAVS ON THE EFFICIENCY OF LASER DEVICES

The article is devoted to the study of the effect of laser radiation on the material of the hulls of aircraft and the possibility of its use as a means of defeating aerial targets.

It was determined that the traditional weapons systems used in the conduct of hostilities are increasingly less effective at the present time, especially in the fight against unmanned aerial objects. Because of this, experts drew attention to the possibility of using combat lasers as a means of defeat. What is the current state and prospects of creating effective samples of laser weapons that use a powerful beam as a striking tool, its strengths and weaknesses?

Taking into account the need to counter new types of threats, the question arises whether quantum-optical means can replace traditional types of weapons and when this can happen? Hard to say. But, taking into account how this area is developing, we can talk about real achievements in the development of laser weapons.

The advantages of laser weapons in comparison with conventional weapons are small costs for hitting objects, the speed of hitting (at the speed of light), an unlimited number of shots, thanks to its speed and target tracking systems, it can hit many targets at the same time, under favorable weather conditions, it can reach very long distances. Regarding the disadvantages of this type of weapon, they require a lot of energy, since the means emit a lot of heat during use, additional cooling is required, firing only in a straight line, strong dependence on the state of the atmosphere.

Laser weapons of direct destruction allow to violate the structural integrity of the aircraft, initiate its explosion or intense burning of explosive or flammable substances located on the object. Laser radiation is produced as part of an orderly process of forced emission. The laser emits coherent monochromatic light in the form of a parallel beam of directed energy, which propagates at the speed of light, which is tens of thousands of times faster than the speed of modern rockets. This indicates that there is no alternative to the development of combat lasers.

Key words: laser weapons, damage to objects, laser beam.

РАДІОТЕХНІКА ТА ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЇ

УДК 654.1

DOI <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2024.4/05>**Кононова І.В.**Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»**Некрутенко В.І.**Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

МОДЕЛЬ ШЛЯХУ ІНФОРМАЦІЙНОГО НАПРЯМКУ МЕРЕЖІ ЗВ'ЯЗКУ СПЕЦІАЛЬНОГО ПРИЗНАЧЕННЯ З РЕАЛЬНОЮ НАДІЙНІСТЮ ОБЛАДНАННЯ

Розроблено модель, яка встановлює зв'язок між показниками надійності комунікаційного обладнання та якістю функціонування інформаційного шляху мережі зв'язку спеціального призначення. Особливістю запропонованої моделі є сумісне врахування багатофазного обслуговування пакетів та обмеженої надійності комунікаційного обладнання. Запропоновано для оцінки якості обслуговування застосовувати показник ймовірності своєчасної доставки повідомлень по шляху інформаційного напрямку мережі зв'язку. Визначено умови своєчасної доставки повідомлення розглянутим інформаційним шляхом. У розробленій моделі враховано різноманітне обладнання всіх фаз обслуговування. Функція розподілу часу відновлення обладнання шляху мережі визначається з урахуванням ймовірності виникнення відмов обладнання на кожній фазі обслуговування. Також накладено обмеження на сумарний час передачі заявки на встановлення з'єднання по шляху інформаційного напрямку мережі зв'язку, що визначає допустимий час затримки. Величина даного обмеження характеризує використовуваний в мережі часовий резерв, що витрачається при обслуговуванні заявки в кожній фазі.

Отримані розрахункові співвідношення для кількісної оцінки показників якості шляхів інформаційних напрямків мережі зв'язку спеціального призначення, які враховують характеристики надійності обладнання мережі зв'язку і резерв часу, який використовується при обслуговуванні заявок у кожній фазі, а також наявність повної або обмеженої інформації про функції розподілу часу обслуговування в кожній фазі.

Ключові слова: комунікаційне обладнання, мережа зв'язку спеціального призначення, надійність, ймовірність своєчасної доставки пакетів.

Постановка проблеми. У процесі функціонування мережі зв'язку спеціального призначення (МЗСП) на них можуть виникати різні екстремальні ситуації, причинами яких є різноманітні зовнішні та внутрішні фактори [1]. У результаті цього, можуть виходити з ладу як окремі елементи, так і цілі ділянки мережі (інформаційні напрямки, шляхи), що приводить до структурно-топологічних змін, тобто порушенню зв'язку між певними пунктами мережі. У результаті цих змін можливе значне зниження значень показників якості обслуговування користувачів мережі [2].

Велика кількість елементів сучасних і перспективних МЗСП навіть при досить високій безвідмовності окремих елементів може призвести до

помітного погіршення показників безвідмовності мережі зв'язку та зниженню якості її функціонування.

Тому актуальним є підхід при якому якість функціонування інформаційного шляху існуючих та перспективних МЗСП оцінюється з урахуванням реальної надійності комунікаційного обладнання. Об'єктом теоретичного дослідження є процес функціонування інформаційного шляху МЗСП в умовах обмеженої надійності комунікаційного обладнання.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Завдання побудови аналітичних моделей та розвитку методів дослідження процесів функціонування, оптимізації побудови (синтезу), про-

ектування мереж зв'язку розглядалися в роботах вітчизняних та закордонних вчених [3–5]. Дані рішення ґрунтуються на загальних методах дослідження і оптимізації побудови мереж зв'язку, які розроблені в працях [6–8]. В розглянутих наукових працях практично відсутні результати, що стосуються дослідженню впливу обмеженої надійності комунікаційного обладнання на ймовірність своєчасної доставки повідомлень. Крім того, зазначені вище дослідження присвячені вивченню електронних комунікаційних мереж загального призначення і не повною мірою враховують особливості побудови та функціонування мереж зв'язку спеціального призначення.

Тому вибір напрямку дослідження – розробка моделі, яка встановлює зв'язок між показниками надійності комунікаційного обладнання та якістю функціонування інформаційного шляху МЗСП є обґрунтованим та актуальним.

Постановка завдання. Метою роботи є побудова математичної моделі багатофазної мережі зв'язку спеціального призначення з урахуванням реальної надійності комунікаційного обладнання.

Виклад основного матеріалу дослідження. Розглянемо шлях інформаційного напрямку мережі зв'язку, фрагмент якої представлено на рис. 1.

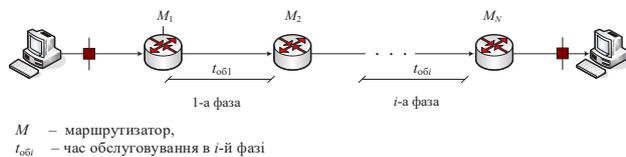


Рис. 1. Фрагмент шляху інформаційного напрямку мережі зв'язку

Сформулюємо постановку задачі. Нехай на вхід цієї мережі надходить потік повідомлень, який приблизно можна вважати пуасоновським [8]. Вхідний потік другої та наступної фаз вважається згладженим пуасоновським потоком. За інженерними розрахунками можливо вважати, як це відображено у ряді робіт, що вхідний потік у кожен фазу є пуасоновським з параметром $\lambda_{вх}$ [9].

У кожній фазі здійснюється обслуговування повідомлень (заявок, пакетів), зокрема час обслуговування $t_{обi} = t_{об}$ – випадкова величина з довільною ФР $B(t) = P\{t_{об} < t\}$.

Обладнання кожної фази має обмежену надійність, тому в процесі обслуговування заявок в i -й фазі ($i = \overline{1, n}$) можливе виникнення відмови з інтенсивністю λ_i . Сумарна інтенсивність відмов обладнання шляху мережі зв'язку, що складається з обладнання n фаз обслуговування, дорівнює:

$$\lambda_c = \sum_{i=1}^n \lambda_i. \quad (1)$$

При відмові обладнання i -ї фази обслуговування ($i = \overline{1, n}$) здійснюється відновлення працездатності, зокрема час відновлення – випадкова величина з довільною ФР $F_{вi}(t) = P\{t_{вi} < t\}$ і кінцевим математичним очікуванням $\bar{t}_{вi}$. Оскільки обладнання всіх фаз обслуговування різнотипне, то ФР часу відновлення обладнання шляху мережі $F_{вс}(t)$ визначається з урахуванням ймовірності виникнення відмови обладнання i -ї фази, тобто:

$$F_{вс}(t) = P\{t_{вс} < t\} = \sum_{i=1}^n \frac{\lambda_i}{\lambda_c} F_{вi}(t), \quad (2)$$

де λ_c – сумарна інтенсивність відмов обладнання шляху мережі зв'язку (формула (1));

$t_{вс}$ – час відновлення працездатності обладнання шляху мережі зв'язку.

На сумарний час передачі заявки на встановлення з'єднання по шляху інформаційного напрямку $t_{\Sigma об}$ мережі зв'язку накладається обмеження, що визначає допустимий час t_d затримки. Величина даного обмеження характеризує використовуваний в мережі часовий резерв, що витрачається при обслуговуванні заявки в кожній фазі.

Для зазначених вище вихідних умов необхідно отримати розрахункові співвідношення для ймовірності своєчасної доставки повідомлень по розглянутому шляху напрямку мережі зв'язку.

При розв'язанні цієї задачі приймемо наступні обмеження і допущення:

вважається, що час обслуговування заявки в кожній фазі розподілений за експоненціальним або за нормальним законом чи за законом Ерланга k -го порядку [10];

крім того, розглянуто випадок, коли ФР $B(t)$ невідома, а визначені тільки два початкових моменти;

випадкова величина t_{oi} розподілена за експоненціальним законом з параметром λ_i , а час відновлення працездатності обладнання шляху інформаційного напрямку мережі зв'язку $t_{вс}$ розподілено за довільним законом $F_{вс}(t)$ (формула (2)) з кінцевим математичним очікуванням $\bar{t}_{вс}$;

вхідний потік заявок у кожен фазу є пуасоновським з параметром $\lambda_{вх}$;

відмови обладнання кожної фази обслуговування – події незалежні;

при відмові обладнання i -ї фази мережа припиняє функціонування шляху до моменту відновлення працездатності;

відмови виявляються в момент їхнього виникнення (в мережі передбачений ідеальний (повний,

неперервний, безпомилковий) контроль працездатності);

повідомлення, обслуговування якого переврано внаслідок виникаючої відмови, вважається загубленим.

Для своєчасної доставки повідомлення по даній мережі зв'язку потрібне виконання декількох умов [10]:

1) заявка, що надійшла на обслуговування, застала обладнання шляху мережі зв'язку в працездатному стані;

2) час передачі заявки на встановлення з'єднання в шляху інформаційного напрямку мережі зв'язку не перевищив допустимого значення t_d ;

3) заявка при надходженні до шляху інформаційного напрямку мережі зв'язку не отримала відмову в обслуговуванні в жодній з фаз.

Оскільки зазначені вище події є незалежними, то ймовірність своєчасної доставки повідомлення $P_{св}(t_d)$ можна подати у вигляді добутків ймовірностей цих подій, тобто

$$P_{св}(t_d) = P_1 P_2(t_d) P_3, \quad (3)$$

де P_1 – ймовірність застати обладнання шляхів інформаційного напрямку мережі в працездатному стані у довільний момент часу в сталому режимі;

P_2 – ймовірністю того, що сумарний час доставки повідомлення абоненту не буде перевищувати допустимої величини t_d ;

P_3 – ймовірність того, що при надходженні в мережу зв'язку заявка не отримає відмову в обслуговуванні у жодній з фаз.

Ймовірність P_1 представляє собою стаціонарний коефіцієнт готовності обладнання шляху інформаційного напрямку мережі зв'язку K_r , кількісна оцінка якого визначається за формулою:

$$K_r = \frac{\bar{t}_{ос}}{\bar{t}_{ос} + \bar{t}_{вс}}, \quad (4)$$

де $\bar{t}_{ос}$ та $\bar{t}_{вс}$ – відповідно середнє напрацювання до відмови та середній час відновлення обладнання шляху інформаційного напрямку мережі зв'язку, тобто:

$$\bar{t}_{ос} = \frac{1}{\lambda_c} = \frac{1}{\sum_{i=1}^n \lambda_i}, \quad \bar{t}_{вс} = \sum_{i=1}^n \frac{\lambda_i \bar{t}_{вi}}{\lambda_c}. \quad (5)$$

Ймовірність $P_2(t_d)$ представляє собою ймовірність того, що сумарний час доставки повідомлення абоненту $t_{\Sigma об}$ не буде перевищувати допустимої величини t_d .

Для розрахунку ймовірності $P_2(t_d)$ необхідно визначити ФР сумарного часу доставки пові-

домлення $t_{\Sigma об}$. Цей час визначається сумою n однаково розподілених випадкових величин $t_{об}$, які характеризують час обслуговування заявки в кожній фазі мережі. Тому, ФР випадкової величини $t_{\Sigma об}$ представляє собою n -кратну згортку $B_n(t) = P\{t_{\Sigma об} < t\}$ функції розподілу $B(t)$.

Функція розподілу $B_n(t)$ при експоненціальному розподілі $B(t)$ має вид:

$$B_n(t) = 1 - e^{-\mu_{об} t} \sum_{i=0}^{n-1} \frac{(\mu_{об} t)^i}{i!}, \quad (6)$$

при нормальному розподілі $B(t)$ ($\bar{t}_{об} \geq 3\sigma_{об}$)

$$B_n(t) = 0,5 + \Phi\left(\frac{t - n\bar{t}_{об}}{\sigma_{об}\sqrt{n}}\right), \quad (7)$$

при розподілі Ерланга k -го порядку з параметром $\mu_{об} = \frac{k}{\bar{t}_{об}}$

$$B_n(t) = 1 - e^{-\mu_{об} t} \sum_{i=0}^{nk-1} \frac{(\mu_{об} t)^i}{i!}, \quad (8)$$

де $\Phi(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_0^x e^{-\frac{u^2}{2}} du$ – табульована функція Лапласа.

Якщо в ці формули підставити замість t значення t_d , то отримаємо розрахункові співвідношення для ймовірності $P_2(t_d) = P\{t_{\Sigma об} \leq t_d\}$.

Ймовірність P_3 є ймовірність того, що заявка при надходженні у шлях ІН мережі зв'язку не отримала відмову у обслуговуванні в жодній з фаз (вибраний шлях має вільний каналний ресурс, необхідний для обслуговування повідомлення r -го типу). Для визначенні цієї ймовірності застосуємо метод просіяного навантаження [8, 10]. Основна ідея методу полягає в тому, що при визначенні навантаження, яке надходить на деяку фазу, шляху враховується ефект «просіювання» потоку викликів. Стосовно трафіку мультисервісних мереж це означає, що неоднорідний потік повідомлень, який проходить через l -у фазу шляху, утворює сумарне навантаження з інтенсивністю

$$\Lambda_l = \sum_{r \in H_l} b_r \rho_r \prod_{i \in l} (1 - \beta_i),$$

де $\rho_r = \lambda_{вх} h_r$, β_i – ймовірність того, що у довільний момент часу i -а фаза шляху ІН мережі зв'язку не має вільний ресурс для надання обслуговування повідомлення l -го типу. Тоді відповідно з апроксимацією Келі [10] ймовірність того, що в довільний момент часу усі ресурси середовища передачі на l -й фазі мережі зайняті, можна наближено визначити за допомогою першої формули Ерланга:

$$\beta_l = E(V_l, \Lambda_l).$$

Згідно з [9] система рівнянь β_l має єдине рішення, яке буде знайдено за допомогою іте-

раційної процедури (метод підстановки). Після цього розраховується ймовірність того, що повідомлення r -го типу не отримують відмову в обслуговуванні

$$P_3 = \prod_{l \in \mu} (1 - \beta_l). \quad (9)$$

Підставляючи отримані вирази для ймовірностей P_1 , $P_2(t_d)$, P_3 в формулу (3), остаточно отримуємо розрахункові співвідношення для прийнятого показника якості функціонування мережі зв'язку: при експоненціальному розподілі $B(t)$ часу обслуговування заявки в одній фазі мережі

$$P_{св}(t_d) = \frac{\bar{t}_{oc} \left(1 - e^{-\mu_{об} t_d} \sum_{i=0}^{k-1} \frac{(\mu_{об} t_d)^i}{i!} \right) \prod_{l \in \mu} (1 - \beta_l)}{\bar{t}_{oc} + \bar{t}_{вс}}, \quad (10)$$

при нормальному розподілі $B(t)$ з параметрами $\bar{t}_{об}$ та $\sigma_{об}$ ($\bar{t}_{об} \geq 3\sigma_{об}$)

$$P_{св}(t_d) = \frac{\bar{t}_{oc} \prod_{l \in \mu} (1 - \beta_l)}{\bar{t}_{oc} + \bar{t}_{вс}} \left[0,5 + \Phi \left(\frac{t_d - n \bar{t}_{об}}{\sigma_{об} \sqrt{n}} \right) \right], \quad (11)$$

при розподілі $B(t)$ за законом Ерланга з параметрами k та $\mu_{об} = k/\bar{t}_{об}$

$$P_{св}(t_d) = \frac{\bar{t}_{oc} \left(1 - e^{-\mu_{об} t_d} \sum_{i=0}^{nk-1} \frac{(\mu_{об} t_d)^i}{i!} \right) \prod_{l \in \mu} (1 - \beta_l)}{\bar{t}_{oc} + \bar{t}_{вс}}, \quad (12)$$

$$\text{де } \bar{t}_{oc} = \frac{1}{\lambda_c} = \frac{1}{\sum_{i=1}^n \lambda_i}; \quad \bar{t}_{вс} = \sum_{i=1}^n \frac{\lambda_i \bar{t}_{вi}}{\lambda_c};$$

Відзначимо, що наведені вище формули для кількісної оцінки ймовірності своєчасної доставки повідомлення враховують характеристики надійності обладнання мережі зв'язку і резерв часу, який використовується при обслуговуванні заявок у кожній фазі.

Розглянемо випадок, коли точний вид ФР $B_n(t)$ невідомий, а визначені тільки два початкових моменти

$$u_1 = \int_0^{\infty} t dB_n(t),$$

$$u_2 = \int_0^{\infty} t^2 dB_n(t),$$

причому $0 < u_1^2 < u_2 < \infty$. Неважко побачити, що функціонал

$$I(B_n) = B_n(t_d) = P_2(t_d) = \int_0^{t_d} dB_n(t)$$

з точністю до позначень збігається з функціоналом $I_1(F_b)$ [10]. Тому можна записати обмежені значення ймовірності $P_2(t_d)$, таким чином:

$$\min P_2(t_d) = \begin{cases} \frac{t_d - u_1}{t_d}, & u_1 \leq t_d < \frac{u_2}{u_1}, \\ \frac{(t_d - u_1)^2}{u_2 - 2u_1 t_d + t_d^2}, & t_d \geq \frac{u_2}{u_1}, \end{cases} \quad (13)$$

$$\max P_2(t_d) = 1, \quad t_d \geq u_1. \quad (14)$$

Графіки залежності ймовірності $P_2(t_d)$ від величини $\frac{t_d}{n \bar{t}_{об}}$ при $n = 1, 2, 3$ для випадків експоненціальної та нормальної ФР $B(t)$ зображені на рис. 1 і рис. 2.

У табл. 1 наведені значення ймовірності $P_2(t_d)$ при повній та обмеженій інформації про ФР часу обслуговування $B(t)$, при цьому значення початкових моментів u_1 і u_2 відповідають моментам при нормальному розподілі та розподілі Ерланга.

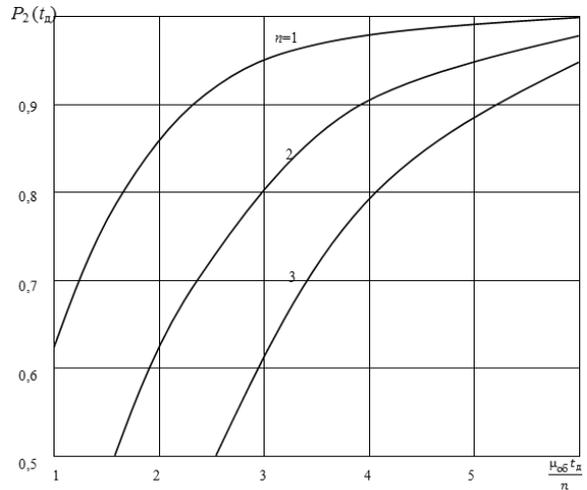


Рис. 1. Графіки залежності $P_2(t_d)$ від відносної величини допустимого часу t_d для n фаз обслуговування ($n=1, 2, 3$) при експоненціальній ФР $B(t)$

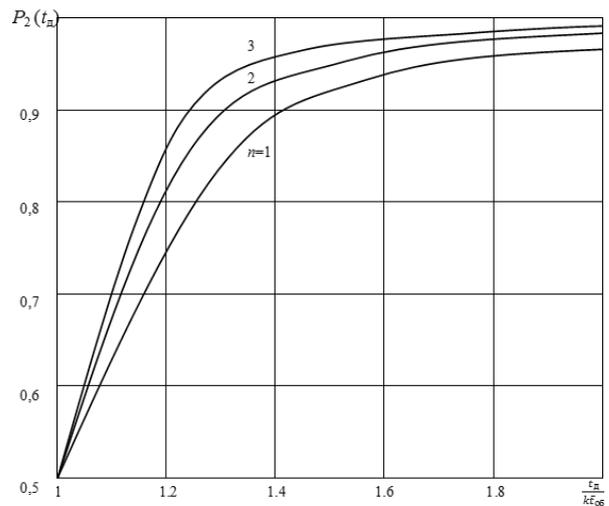


Рис. 2. Графіки залежності $P_2(t_d)$ від відносної величини допустимого часу t_d для n фаз обслуговування ($n=1, 2, 3$) при нормальній ФР $B(t)$

Таблиця 1

Значення ймовірності $P_2(t_d)$ при повній та обмеженій інформації про ФР часу обслуговування $B(t)$

| Вид ФР $B(t)$ | Відомо два початкових моменти u_1 та u_2 ФР $B(t)$ | | Відомо вид ФР $B(t)$ |
|--|--|-----------------|----------------------|
| | $\min P_2(t_d)$ | $\max P_2(t_d)$ | |
| Ерланга при $n=2$ та $(\mu_{об}t_d) / n=6$ | 0,98 | 1,0 | 0,983 |
| Ерланга при $n=3$ та $(\mu_{об}t_d) / n=9$ | 0,994 | 1,0 | 0,995 |
| Нормальна при $n = 1$ та $t_d / (n\bar{t}_{об}) = 2,2$ | 0,93 | 1,0 | 0,999 |
| Нормальна при $n = 2$ та $t_d / (n\bar{t}_{об}) = 2$ | 0,95 | 1,0 | 0,9998 |
| Нормальна при $n = 3$ та $t_d / (n\bar{t}_{об}) = 1,8$ | 0,96 | 1,0 | 0,9999 |

З таблиці видно, що при обмеженій вихідній інформації про ФР $B(t)$ точне невідоме нам значення ймовірності $P_2(t_d)$, лежить у середині інтервалу, обмеженого двосторонніми оцінками $\min P_2(t_d)$ та $\max P_2(t_d)$, отриманими при відомих початкових моментах u_1 і u_2 .

Після підстановки формул для ймовірностей P_1 , $\min P_2(t_d)$, $\max P_2(t_d)$ і P_3 в формулу (3) отримуємо двосторонні оцінки ймовірності своєчасної доставки повідомлення у випадку обмеженої інформації про ФР $B(t)$:

$$\min P_{св}(t_d) = \begin{cases} \frac{\bar{t}_{ос} \prod_{i \in \mu} (1 - \beta_i)(t_d - u_i)}{(\bar{t}_{ос} + \bar{t}_{вс})t_d}, & \text{при } u_1 \leq t_d < \frac{u_2}{u_1}, \\ \frac{\bar{t}_{ос} \prod_{i \in \mu} (1 - \beta_i)(t_d - u_i)^2}{(\bar{t}_{ос} + \bar{t}_{вс})(u_2 - 2u_1t_d + t_d^2)}, & \text{при } t_d \geq \frac{u_2}{u_1}, \end{cases} \quad (15)$$

$$\max P_{св}(t_d) = \frac{\bar{t}_{ос} \prod_{i \in \mu} (1 - \beta_i)}{\bar{t}_{ос} + \bar{t}_{вс}}, \quad t_d \geq u_1. \quad (16)$$

Таким чином, розроблені моделі та отримані розрахункові співвідношення для оцінки показників якості шляхів інформаційних напрямків МЗСП, які враховують реальну надійність обладнання, а також наявність повної або обмеженої інформації про ФР часу обслуговування в кожній фазі.

Наведемо деякі результати теоретичного дослідження отриманих розрахункових співвідношень. Розглянемо трифазний ($n = 3$) шлях інформаційного напрямку МЗСП, який характеризується наступними даними: $\lambda_i = \lambda = 10^{-3}$ 1/год; $\bar{t}_{вi} = \bar{t}_в = 1,0$ год; $\bar{t}_{обi} = \bar{t}_{об} = 1/\mu_{об} = 3$ с, $i = \overline{1,3}$; $\bar{t}_д \geq 3\bar{t}_{об}$; $P_3 = 0,95$; $u_1 = 9$ с; $u_2 = 90$ с². Побудуємо графіки залежності ймовірності $P_{св}(t_d)$ від допустимого часу t_d для двох випадків розподілу $B(t)$ часу обслуговування заявки в одній фазі: експоненціального з параметром $\mu_{об}$ та нормального з параметром $\bar{t}_{обi} = 1/\mu_{об}$ й $\sigma_{об} = \bar{t}_{об}/3$, а також для випадку, коли ФР $B(t)$ невідома, а отримані тільки два початкових моменти u_1 і u_2 . При розрахунках скористаємося формулами (10), (11), (15), (16) та наведеними вище вихідними даними.

Результати розрахунків представлені на рис. 3 та 4.

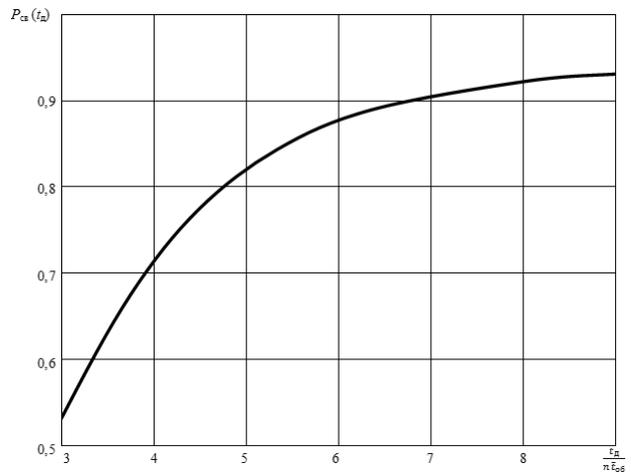


Рис. 3. Залежність ймовірності своєчасної доставки повідомлення від відносної величини допустимого часу при експоненціальній ФР часу обслуговування в одній фазі

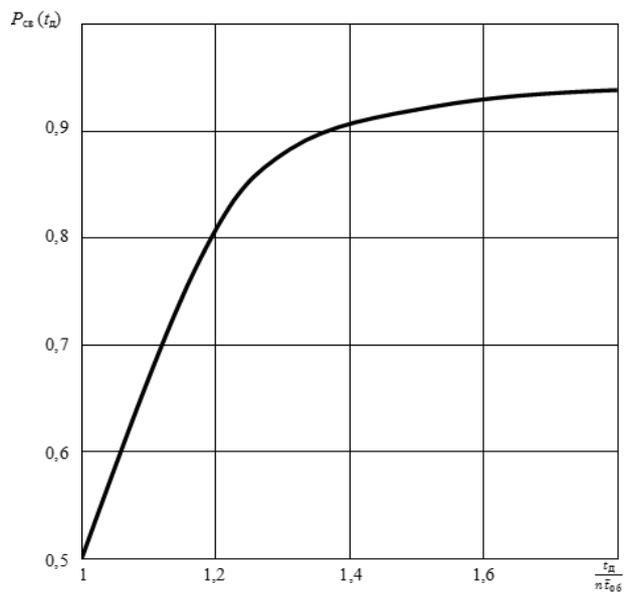


Рис. 4. Залежність ймовірності своєчасної доставки повідомлення від відносної величини допустимого часу при нормальній ФР часу обслуговування в одній фазі

Висновки. Таким чином, отримані розрахункові співвідношення для ймовірності своєчасної доставки повідомлень по інформаційному шляху МЗСП з урахуванням обмеженої надійності комунікаційного обладнання.

Аналіз отриманих виразів та побудованих на їх основі графіків дозволяє обґрунтувати величину резервного (допустимого) часу для забезпечення потрібного (заданого) значення $P_{cb}(t_d)$. Зокрема, для досягнення $P_{cb}(t_d) = 0,9$ (рис. 3) при експоненціальному законі обслуговування пакетів в кожній

фазі трифазової ($n = 3$) мережі необхідно збільшити резервний час t_d у 7 разів порівняно з середнім часом обслуговування $n\bar{t}_{об}$. При нормальному законі обслуговування пакетів в кожній фазі трифазної мережі (рис. 4) для досягнення того ж значення $P_{cb}(t_d) = 0,9$ необхідно збільшити резервний час t_d в 1,35 рази порівняно з $n\bar{t}_{об}$. При відомих двох початкових моментах ФР $B(t)$ необхідне значення $P_{cb}(t_d) = 0,9$ буде знаходитися в середині інтервалу, обмеженого значеннями $\min P_{cb}(t_d)$ та $\max P_{cb}(t_d)$ при $t_d = 2,5u_1 = 22,5$ с.

Список літератури:

1. Фещенко А.Б., Загора О.В., Борисова Л.В. Удосконалення імовірнісної моделі типового фрагмента відомчої цифрової телекомунікаційної мережі ДСНС. С. 120 – 132. *Problems of Emergency Situations*. 2020. № 1(31). Р. 34–43. DOI: 10.5281/zenodo.3901945.
2. Yakovyna V.S., Seniv M.M., Symets I.I. Sambir Algorithms and software suite for reliability assessment of complex technical systems. *Radio Electronics, Computer Science, Control*. 2020, vol. 4. Р. 163–177. DOI:10.15588/1607-3274-2020-4-16.
3. Єременко О.С., Мерсні А. Підвищення відмовостійкості елементів сучасних інфокомунікаційних мереж із застосуванням протоколів резервування шлюзу за замовчуванням. *Проблеми телекомунікацій*. 2020. № 2(27). С. 68–81. DOI: <https://doi.org/10.30837/pt.2020.2.06>.
4. Князева Н. Ненов О. Оцінка структурної надійності телекомунікаційних мереж невизначеної топології на основі імітаційного моделювання. *Вісник Університету «Україна» Серія Інформатика, обчислювальна техніка та кібернетика*. 2021. 2(23). URL: <https://visn-it.uu.edu.ua/index.php/visnicct/article/view/54>.
5. Kim Y., Song K., Pham H., Chang I. A Software Reliability Model with Dependent Failure and Optimal Release Time. *Symmetry*. 2022. vol. 14 (2). DOI:10.3390/sym14020343.
6. Raghuvanshi K., Agarwal A., Jain K. A time-variant fault detection software reliability model, *SN Appl. Sci*. 2021. № 3 (18). DOI:10.1007/s42452-020-04015-z.
7. Борисова Л. В., Загора О. В., Фещенко А. Б. Розробка імовірнісної моделі елементарного фрагмента відомчої інформаційно-телекомунікаційної мережі. *Problems of Emergency Situations*. 2020. № 1 (31). Р. 34–43. DOI:10.5281/zenodo.3901945.
8. Mogylyevych D., Kononova I., Klymovych O., Mohylevych V. The method of comprehensive assessment of the reliability of telecommunication equipment of communication networks. *Military and technical collection 2020*. № 23. Р. 50–57. DOI: <https://doi.org/10.33577/2312-4458.23.2020.50-57>.
9. Mogylyevych D., Kononova I., Kredentser B., Karadschow I. Comprehensive Reliability Assessment Technique of Telecommunication Networks Equipment with Reducible Structure. *Вісник НТУУ «КПІ». Серія Радіотехніка*. 2020. № 80. С. 39–47.
10. Креденцер Б., Міночкін А., Могилевич І. Надійність систем з надлишковістю: методи, моделі, оптимізація: монографія. Київ: Фенікс, 2013. 342 с.

Kononova I.V., Nekrutenko V.I. MODEL OF THE INFORMATION PATH OF A SPECIAL-PURPOSE COMMUNICATION NETWORK WITH REAL EQUIPMENT RELIABILITY

A model has been developed that establishes a link between the reliability indicators of communication equipment and the quality of functioning of the information path of a special-purpose communication network. A feature of the proposed model is the joint consideration of multiphase packet service and limited reliability of communication equipment. It is proposed to use an indicator of the probability of timely delivery of messages along the path of the information direction of the communication network to assess the quality of service. The conditions for timely delivery of messages along the considered information path are determined. The developed model takes into account different types of equipment of all phases of service. The distribution function of the network path equipment recovery time is determined taking into account the probability of equipment failures at each service phase. Also, a restriction is imposed on the total time of transmission of a connection request along the path of the information direction of the communication network, which determines the permissible delay time. The value of this limitation characterizes the time reserve used in the network, which is spent on servicing the application in each phase.

The calculation relations for quantifying the quality indicators of the paths of information directions of a special-purpose communication network are obtained, which take into account the reliability characteristics of the communication network equipment and the time reserve used in servicing applications in each phase, as well as the availability of complete or limited information about the functions of service time distribution in each phase.

Key words: communication equipment, special-purpose communication network, reliability, probability of timely delivery of packets.

УДК 621.396

DOI <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2024.4/06>**Корчинський В.М.**

Дніпровський національний університет імені Олеся Гончара

ОПТИМІЗАЦІЯ ПРОПУСКНОЇ ЗДАТНОСТІ ІНФОРМАЦІЙНИХ КАНАЛІВ ПЕРЕДАЧІ РАСТРОВИХ ЗОБРАЖЕНЬ

У статті пропонується метод визначення пропускної здатності телекомунікаційних каналів з адитивним шумом при передачі растрових зображень, зафіксованих засобами дистанційного зондування у довільній кількості спектральних інтервалів електромагнітного проміння, оптимальної за інформаційним та енергетичним критеріями. Метод базується на компресії даних, оптимізованій за критеріями: 1) мінімізація інформаційної відстані Кульбака-Лейблера (Kullback-Leibler) між скомпресованим та вихідним сигналами; 2) максимізація відношення сигнальної енергії інформативного сигналу, збереженої у скомпресованому зображенні, до сигнальної енергії залишкового шуму (відношення «сигнал/шум»).

Компресія сигналів реалізована на основі розкладів їх розгортки Пеано-Гільберта по одному з дискретних ортогональних вейвлет-базисів та обнуленні частини коефіцієнтів розкладу.

Встановлено, що при збільшенні порогу обнулення відношення «сигнал/шум» зростає, а інформаційна відстань Кульбака-Лейблера між вихідним та скомпресованим інформаційними сигналами зменшується.

Визначення порогів обнулення, яке забезпечує компроміс між вимогами збільшення відношення «сигнал/шум» та мінімізації відстані Кульбака-Лейблера між вихідним та скомпресованим інформаційними сигналами сформульовано у вигляді двокритеріальної оптимізаційної задачі мінімізації відхилень відстані Кульбака-Лейблера скомпресованого інформаційного сигналу стосовно вихідного сигналу та відношення «сигнал/шум» у скомпресованому сигналі від наперед заданих значень. Використано метод розв'язання оптимізаційної задачі, який забезпечує можливість завдання коефіцієнтів значущості різних критеріїв оптимізації.

Показано, що за використання ортогональних вейвлет-базисів збільшення рівня вейвлет-декомпозиції веде до зростання як відношення «сигнал/шум» у реконструйованому сигналі, так й інформаційної відстані між ним та вихідним сигналом.

Встановлено, що при збільшенні порогу обнулення коефіцієнтів вейвлет-розкладів зростає пропускна здатність інформаційного каналу з обмеженою частотною смугою.

Ключові слова: пропускна здатність, інформаційна відстань, відношення «сигнал/шум», дискретний ортогональний вейвлет-базис, інформаційна відстань.

Постановка проблеми. Розглядаються процеси передавання зображень матеріальних об'єктів, отриманих засобами дистанційного зондування (ДЗ) у низці спектральних інтервалів електромагнітного проміння – носія видової інформації. Інформаційними сигналами ДЗ є розподіли власної яскравості візуалізованих об'єктів (або їхні відбивальні здатності) у відповідних спектральних інтервалах. На даний час найбільш поширеним способом отримання видових даних ДЗ є сканерний спосіб, за якого зображення фіксуються рядок за рядком лінійними масивами сенсорних елементів у різних інтервалах електромагнітного спектру в процесі руху цих, причому зв'язок між власною яскравістю об'єктів та розподілом яскравості отриманого зображення є лінійним [1, с. 142]. Після діджиталізації отриманих сигналів, формується множина растрових зображень у різних спектраль-

них інтервалах проміння, кожне з яких має окрему інформаційну значущість для тематичного аналізу власної яскравості як подання характеристик візуалізованих об'єктів. Ефективність передачі таких даних по інформаційному каналу з обмеженою частотною смугою за наявності каналних шумів суттєво залежить від обсягу даних, що передаються. Зазначимо, що з позицій прикладного тематичного аналізу отриманих видових даних використання множини зображень, отриманих в усій множині спектральних інтервалів, є надлишковим. Це зумовлює постановку двоєдиної проблеми оптимізації пропускної здатності каналу шляхом компресії вихідних багатоспектральних даних за критеріями мінімізації відмінності вихідного та отриманого сигналів й залишкового шуму за умови збереження рівня інформативності, достатнього для достовірного тематичного аналізу видових даних.

Аналіз останніх досліджень та публікацій. Основним шляхом зменшення інформаційної надлишковості первинних (вихідних) даних є їхня компресія. Питанням компресії інформаційних сигналів та пригнічення адитивних шумів на них присвячена значна кількість досліджень, у яких ці аспекти проблеми розглядалися окремо. Численні алгоритми фільтрації шумів базуються на різних варіантах лінійної та нелінійної обробки сигналів без зв'язку з їх компресією (див., наприклад [2, с. 614–724]).

Усі відомі методи компресії цифрових сигналів базуються на їх розкладі по одному з повних дискретних функціональних базисів [3, с. 120–172] або ортогональних вейвлет-базисів [4, с. 183–187]. Питання, пов'язані з перетворенням рівня завад за такої компресії не розглядалися.

Постановка завдання. Метою статті є розробка методу визначення пропускної здатності інформаційних каналів з адитивним шумом, оптимізованої за інформаційними та енергетичними критеріями.

Виклад основного матеріалу дослідження. Сукупність растрових зображень, заданих на растрі розмірністю $n \times m$ пікселів та зафіксованих у s спектральних інтервалах, подаємо тривимірним масивом $\mathbf{P}_{n \times m \times s}$. Для редукації його розмірності використаємо метод, запропонований у роботі [5], який включає послідовно: 1) конкатенацію рядків $\mathbf{P}_{n \times m \times s}$, у результаті чого формується двовимірний масив $\mathbf{Q}_{n \cdot m, s}$; 2) розгортку Пеано-Гільберта масиву $\mathbf{Q}_{n \cdot m, s}$ з утворенням одновимірного дискретизованого масиву даних $G(n)$, $n = 0, N-1$, який розглядаємо як сигнал, який передається по інформаційному каналу з адитивним гаусівським шумом.

Використаємо його подання сигналу $G(n)$ у вигляді розкладу по одному з ортогональних вейвлет-базисів на j -му рівні декомпозиції:

$$G^{(j)}(n) = \sum_{k=0}^{N-1} c_k^{(j)} \cdot \phi_k^{(j)}(n) + \sum_{s=1}^{j-1} \sum_{k=0}^{N-1} d_k^{(s)} \cdot \psi_k^{(s)}(n), \quad (1)$$

де $\phi_k^{(j)}(n)$, $\psi_k^{(j)}(n)$ – відповідно масштабуючі та деталізуючі базисні функції вейвлет-базису.

Здійснимо обнуління частини деталізуючих коефіцієнтів розкладу (1), починаючи з номеру K : $D_k^{(s)} = d_k^{(s)}$ при $k = 0, K$, $D_k^{(s)} = 0$ при $k \geq K$. Відновлення скомпресованого сигналу здійснюється перетворенням, оберненим до (1).

Проблему відновлення інформаційних сигналів ДЗ розглядаємо у контексті інформаційної теорії вимірювань [6, с. 221–231].

Представимо формування розгортки Пеано-Гільберта отриманого сигналу в операторній формі:

$$\mathbf{P} = \mathbf{M} \cdot \Psi + \zeta, \quad (2)$$

де \mathbf{P} – вектор-стовпець відліків зафіксованого сигналу; Ψ – вектор-стовпець відліків скомпресованого первинного сигналу; \mathbf{M} – матриця, яка подає

оператор формування зафіксованого сигналу; ζ – вектор-стовпець відліків каналного шуму.

Здійснимо лінійне перетворення співвідношення (2) з матрицею \mathbf{R} розмірності $N \times N$, елементи якої задовольняють умові $\mathbf{P} \cdot \mathbf{M} = \mathbf{E}$, де \mathbf{E} – одинична матриця. У результаті отримуємо:

$$\mathbf{R} \cdot \Psi = \Psi + \mathbf{R} \cdot \zeta \quad (3)$$

тобто відновлюється розгортка Пеано-Гільберта первинного сигналу, на яку накладено залишковий шум $\mathbf{R} \cdot \zeta$.

Реконструкція інформаційного сигналу $G_r(n)$ (власної яскравості об'єктів, візуалізованих на зображенні) здійснюється перетворенням, оберненим до (1) з наступним оберненим відображенням Пеано-Гільберта.

За варіювання порогу обнуління коефіцієнтів вейвлет-розкладу K згідно з виразом (1) змінюються як пропускна здатність каналу передачі внаслідок зміни відношення «сигнал/шум» (SNR), так й інформаційна відмінність між відновленим та вихідним інформаційними сигналами, за міру якої приймаємо відстань (відносну ентропію) Кульбака-Лейблера [7]

$$L(g \parallel g_r) = \int_x g(x) \cdot \log_2 \left[\frac{g(x)}{g_r(x)} \right] \cdot dx, \quad (4)$$

де $g(x)$, $g_r(x)$ – відповідно густини розподілів залежностей частот первинного $G(n)$ та реконструйованого $G_r(n)$ сигналів.

Визначення порогу обнуління K формулюємо як однопараметричну двокритеріальну оптимізаційну задачу досягнення мети з цільовими функціями $F_1(K)$ – залежність від K відстані Кульбака-Лейблера між вихідним та відновленим сигналами; $F_2(K)$ – залежність від K відношення «сигнал/шум» у відновленому сигналі. Мета оптимізації: G_1 , G_2 – задані значення відстані Кульбака-Лейблера та нормованої пропускної здатності відповідно.

Для розв'язання поставленої оптимізаційної задачі використовуємо «goal attain method» [7, с. 322–348], який у наведеній постановці зводиться до визначення порогу обнуління K , за якого мінімізується параметр γ за обмежень

$$F_1(K) - w_1 \cdot \gamma \leq G_1; \quad F_2(K) - w_2 \cdot \gamma \leq G_2, \quad (5)$$

де w_1, w_2 – вагові коефіцієнти значущості критеріїв, які належать інтервалу $[0, 1]$.

Нормована пропускна здатність інформаційного каналу визначалася за співвідношенням Шеннона-Хартлі $\frac{C}{W} = \log_2(1 + \text{SNR})$, де C – пропускна здатність, W – ширина частотної смуги пропускання каналу [2, с. 327].

З означення процедури компресії випливає, що інформаційні відстані Кульбака-Лейблера та SNR відновленого сигналу збільшуються при збільшенні порогу обнуління внаслідок чого вимоги

максимізації SNR та мінімізації інформаційної відстані між первинним та відновленим сигналами протилежні. Запропонований метод забезпечує оптимальний компроміс між цими вимогами.

Нижче наведені результати тестування запропонованого методу стосовно багатоспектральних ДЗ земної поверхні.

На рисунках 1, 2 подані RGB-зображення ділянки земної поверхні, зафіксовані у спектральних інтервалах 0.78 мкм – 0.86 мкм (канал R), 0.63 мкм – 0.69 мкм (канал G), 0.52 мкм – 0.60 мкм (канал B) з різним рівнем білого гаусівського шуму.



Рис. 1. Первинне RGB-зображення з гаусівським шумом (дисперсія шуму 0.02)



Рис. 2. Первинне RGB-зображення з гаусівським шумом (дисперсія шуму 0.05)

На рисунках 3, 4 наведені зображення, отримані запропонованим методом за використання вейвлет-базису Хаара на першому рівні декомпозиції при однаковій значущості критеріїв оптимізації ($w_1 = 1, w_2 = 1$ у виразі (5)) за оптимальних значень відстані Кульбака-Лейблера та нормованої пропускної здатності (відповідно 0.252 та 2.871).



Рис. 3. Відновлене зображення з гаусівським шумом (дисперсія шуму 0.02)



Рис. 4. Відновлене зображення з гаусівським шумом (дисперсія шуму 0.05)

Залежність оптимальних значень пропускної здатності, відстані Кульбака-Лейблера та SNR від рівня вейвлет-декомпозиції в умовах наведеного прикладу ілюструється даними таблиці 1.

Таблиця 1

| Рівень декомпозиції | Відстань Кульбака-Лейблера | SNR (дБ) | Нормована пропускна здатність (біт/сек/Гц) |
|---------------------|----------------------------|----------|--|
| 1 | 0.252 | 6.941 | 2.871 |
| 2 | 0.296 | 7.352 | 2.728 |
| 3 | 0.329 | 7.943 | 2.588 |
| 4 | 0.376 | 8.173 | 2.451 |
| 5 | 0.412 | 8.257 | 2.316 |

Як впливає з даних таблиці, при збільшенні рівня вейвлет-декомпозиції зростають оптимальні значення відстані Кульбака-Лейблера та SNR при одночасному зменшенні нормованої пропускної здатності.

При реалізації пропонованого методу отримано типову залежність нормованої пропускної здатності від SNR, наведену на рис. 5 за оптимального значення відстані Кульбака-Лейблера між вихідним та відновленим інформаційними сигналами (пунктирна лінія відповідає вихідному сигналу).

Як впливає з наведеної залежності, максимального значення 2.871 біт/сек/Гц нормована пропускна здатність інформаційного каналу набуває при оптимальному значенні відношення «сигнал/шум» 6.941 дБ.

Висновки. У статті запропоновано метод визначення пропускної здатності передачі багато-

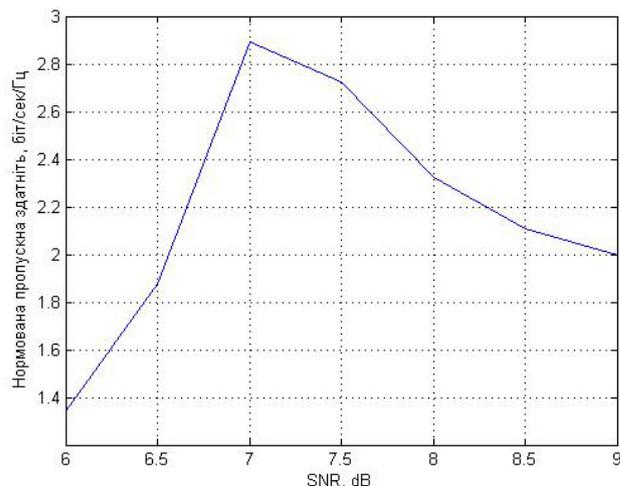


Рис. 5. Залежність нормованої пропускної здатності від відношення «сигнал/шум»

спектральних растрових зображень ДЗ по телекомунікаційних каналах з адитивним шумом на основі компресії сигналів, оптимізованої за критеріями мінімізації інформаційної відмінності вихідного та відновленого сигналів та досягнення заданого значення відношення «сигнал/шум». В основу компресії сигналів покладено їх подання в ортогональних вейвлет-базисах. Перспективи подальших досліджень за проблематикою статті пов'язані з оптимізацією достовірності передачі видових даних ДЗ шляхом їх завадостійкого кодування.

Список літератури:

- Showengerdt R.A. Remote Sensing Models and Methods for Image Processing . N.-Y.: Academic Press, 2007. 560 p.
- Proakis J.G., Manolakis D. Digital Signal Processing. Principles, Algorithms and Application. London: Prentice-Hall International, 2007. 948 p.
- Ahmed N., Rao K.K. Orthogonal Transforms for Digital Signal Processing. Berlin-Heidelberg: Springer-Verlag, 1975. 248 p.
- Chui C.K. An Introduction to Wavelets. San Diego, N.-Y., Boston, London: Academic Press. 1992, 264 p.
- Корчинський В. Фільтрація завад багатоспектральних цифрових сигналів: оптимізаційний підхід // Прикладні питання математичного моделювання. 2023. Том 6, № 4. С. 93–99. <https://doi.org/10.32782/mathematical-modelling/2023-6-1-10>
- Sage A.P., Melse J.I. Estimation Theory with Application to Communication and Control. N.-Y.: McGraw-Hill, 1992. 396 p.
- Cover T.M., Thomas J.A. Elements of information theory. N.-Y.: John Wiley & Sons. 1991. 320 p.
- Stein R.E. Multiple Criteria Optimization: Theory, Computation and Application. New York: John Wiley & Sons Inc., 1986. 546 p.

Korchynskiy V.M. OPTIMIZATION OF THE BANDWIDTH OF RASTER IMAGE TRANSMISSION CHANNELS

The article proposes a method for determining the bandwidth of telecommunication channels with additive noise in the transmission of raster images recorded by means of remote sensing, optimal in terms of information and energy criteria. The method is based on data compression optimized according to the following criteria: 1) minimization of the Kullback-Leibler information distance between the compressed and output signals;

2) maximizing the ratio of the signal energy of the informative signal stored in the compressed image to the signal energy of the residual noise (signal-to-noise ratio).

Compression of signals is implemented on the basis of the expansions of their Peano-Hilbert sweeps on one of the discrete orthogonal wavelet bases and the zeroing of a part of the decomposition coefficients.

It was found that with an increase in the zeroing threshold, the signal-to-noise ratio increases, and the Kullback-Leibler information distance between the original and compressed information signals decreases.

The definition of zeroing thresholds, which provides a compromise between the requirements of increasing the signal-to-noise ratio and minimizing the Kullback-Leibler distance between the output and compressed information signals, is formulated in the form of a two-criteria optimization problem for minimizing deviations of the Kullback-Leibler distance of the compressed information signal relative to the output signal and the signal-to-noise ratio in the compressed signal from predetermined values. The method of solving the optimization problem is used, which provides the possibility of setting the coefficients of significance of various optimization criteria.

It is shown that with the use of orthogonal wavelet bases, an increase in the level of wavelet decomposition leads to an increase in both the signal-to-noise ratio in the reconstructed signal and the information distance between it and the primary signal.

It has been found that with an increase in the threshold of zeroing of the wavelet decomposition coefficients, the bandwidth of the information channel with a limited frequency band increases.

Key words: bandwidth, information distance, signal-to-noise ratio, discrete orthogonal wavelet basis, information distance.

UDC 621.391.052

DOI <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2024.4/07>

Manko O.O.

Kyiv Professional College of Communications

Kharlai L.O.

Kyiv Professional College of Communications

Konovalov O.Yu.

Kyiv Professional College of Communications

Nikiforenko K.B.

Kyiv Professional College of Communications

Sotnichenko Yu.O.

Kyiv Professional College of Communications

Vakas V.I.

Kyiv PJS“Kyivstar”

INCREASING THE EFFICIENCY OF OPTICAL CRYPTOGRAPHY USING PASSIVE OPTICAL ELEMENTS

In the proposed article, a new method of protecting information flows transmitted over optical communication lines is investigated. It is based on the formation of special linear codes with an increased number of units. At the same time, passive optical elements are used to form linear codes and perform reverse operations, namely: fiber splitters and delay lines for a certain part of the clock interval. The use of a special line code significantly increases the level of information protection during unauthorized access to line structures, namely to an optical cable. At the same time, when using a fixed type of code, there is a danger of its interception during unauthorized access and subsequent analysis with the creation of appropriate decryption measures. Taking this into account, the paper proposes a regular change of linear codes according to a pseudo-random law. At the same time, such active devices as optical switches are used. The structural construction of the devices included in the linear optical path, and which are necessary for switching the types of codes used, with the determination of the connections between passive and active equipment, is provided. As the main codes on the basis of which linear codes are formed, the use of RZ optical codes (with a return to zero) is proposed. In order to increase the effectiveness of the protection level, the article proposes dynamic switching of the generated linear codes. Thus, the basis for the operation of the proposed method is fast switching according to the pseudo-random law of linear codes generated according to a special algorithm using optical elements that have a high switching speed. In this work, the use of three types of codes is proposed. The receiving equipment is also built on the decoding of the generated types of codes at the expense of exclusively passive elements and devices. When switching the transmitting device to another type of code, the corresponding inputs of the receiving equipment are connected to the output of the linear path. Given the high speed of switching and the pseudo-random law of switching in time, adequate perception of information when using three types of codes becomes practically impossible.

Key words: optical fiber, unauthorized access, information protection, optical splitter, optical switch, optical delay line.

Introduction. Currently, the amount of confidential information transmitted over optical communication networks is constantly growing. This necessitates the protection of such an important infrastructure as a computer optical communications network from unauthorized access, especially at the level of linear structures, most of which are located outdoors.

Fiber-optic communication lines, due to the characteristics of the distribution of electromagnetic energy in the optical fiber, have increased protection against access to information transmitted along the linear tract [1]. However, there are situations in which access to information becomes possible, and this leads to the need to develop measures to counter such attempts.

The protective sheath, the armor cover and other structural elements of the optical cable (OC) so strongly weaken the possible radiation outside the optical fiber (OF) that it practically does not penetrate the limits of the sheath. Consequently, information interception can only occur due to a violation of the integrity of the outer sheath and other cable sheaths in order to directly access the interception equipment to optical fibers. But even in this situation, without additional effects on the fiber, the interception of the optical signal is impossible, since there is practically no radiation outside the optical fiber.

In order to provide radiation outside the optical fiber in this situation, a bending of the OF is formed. In the place of such bending the law of full internal reflection is violated and radiation of energy of a light signal outside of OF is observed [2]. Because of this, at the point of interception of information, the fiber is characterized by an increased level of losses [1], which can be determined by optical reflectometry [3], or by increasing the error rate in the line. In this case, from the moment of removal of information to the moment of detection of unauthorized connection, some time passes, which depends on the principles of monitoring the line and equipment used for control. If specialized high-sensitivity equipment is used to record information, the radiation at the bend of the OF required for its operation may be quite insignificant. In this case, it is not easy to establish the fact and determine the place of connection with the help of line control equipment. There is a method of determining the moment and place of violation of the armor of the cable in the process of unauthorized connection to the line [4,5], but it allows you to provide supervision at relatively short distances from the point of the control.

There is a method for determining the moment of unauthorized access to optical linear closures along the entire length of the regeneration section [5]. This allows you to accurately determine the location of the optical closure and the moment of access, but the linear structures between the optical closures go unnoticed. Thus, in order to prevent unauthorized access to information flows on optical lines, it is necessary, along with methods for determining the presence of access, to apply additional methods that make it impossible to adequately interpret the information during the fact of access. For this, the use of continuous additional coding (masking) of optical linear codes of the RZ type using passive optical devices was proposed in [6].

Formation of linear codes using passive elements. At this time on optical communication networks there is a use of a linear code type RZ

(return to zero) [6, 7]. The main difference of this code is that the value of the signal corresponding to the transmission of a single symbol is returned to zero before the end of the clock interval. The code type with a return to zero on half of the clock interval T is denoted as RZ-0.50, and on the quarter of the clock interval is denoted as RZ-0.25. The type of code, the duration of a single character of which is the full clock interval T , is denoted as NRZ (without returning to zero).

Studies show that when using the optical transmission system of the linear code RZ-0.25, it is possible, using only passive optical elements such as optical delay lines and optical splitters (dividers), to perform additional coding (masking) of the signal at the input of the tract to protect the information that is transmitted along a linear tract.

Fig.1 shows the method of masking the optical signal in order to protect it from unauthorized access to the linear tract and its subsequent decoding at the receiving end. The figure shows the time diagrams of the code combination during the passage of certain points of the optical linear tract. Here as I the designation of the intensity of the optical signal is given. Fig. 2 shows the construction of a linear tract using this principle. As can be seen from the figure, the output signal of the transmission system, which is also the input signal for the linear tract, based on the code RZ-0.25, and denoted as $I_{in\ RZ-0.25}$, is connected to the optical splitter (OD_1). The optical splitter (divider) works as an optical power divider in half. Then, to the inputs of the second divider (OD_2), operating in the adder mode, connects the part of the signal that has passed through the optical delay line (ODL_1) with a delay time $T/2$ ($I_{out\ ODL\ (T/2)}$) and the undelayed part of the signal. As a result, at the output of the second divider code combinations are formed that differ from the original by twice the number of units (I_Σ), which are transmitted on a linear tract. At the output of the linear tract, the optical power divider (OD_3) is turned on as an optical power divider in half. In this case, to the second divider (OD_4), operating in the adder mode, is fed an undelayed part of the signal I_Σ , and part of the signal that has passed through the delay line (ODL_2) with a delay time $T/4$ ($I_{out\ ODL\ (T/4)}$). After assembling these parts, an optical signal corresponding to the original is formed in the NRZ code ($I_{\Sigma out\ NRZ}$).

The double number of units in the optical linear tract during transmission makes it impossible to adequately recover the signal when trying to gain unauthorized access to information. This ensures the protection of the transmitted information.

The proposed method can be developed and improved, and extended to other types of RZ code. For example, Fig. 3 shows a method of masking linear code combinations of an optical signal in order to protect it from unauthorized access to the linear tract and its subsequent decoding at the receiving end using the optical code RZ-0.125 [6]. Fig. 4 shows the construction of a linear tract using this principle. The construction of the linear tract in this case contains one degree of optical delay more than in the previous case.

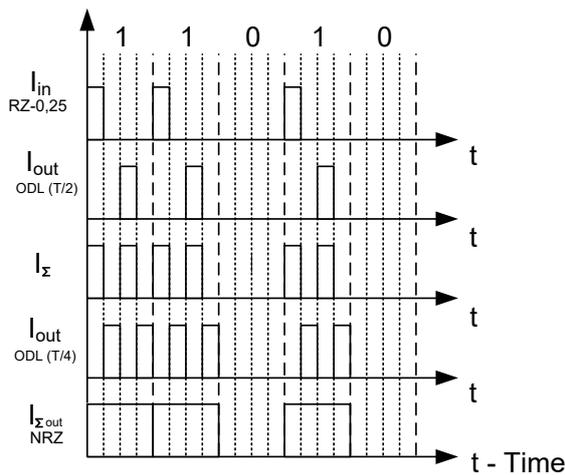


Fig. 1. Method of forming a linear code for the optical signal in the code RZ-0.25 when transmitting it on a linear tract and restoring the output signal in the NRZ code. I – is the designation of the intensity of the optical signal

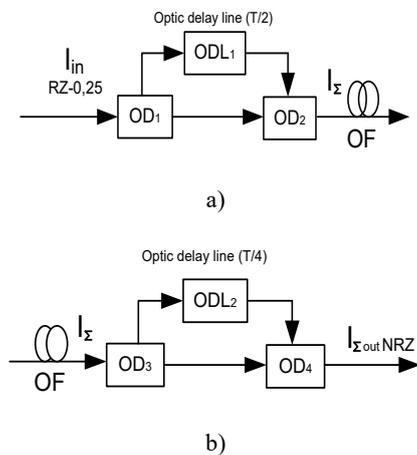


Fig. 2. Construction of a linear tract using linear encoding and decoding of the optical signal in the code RZ-0.25 using passive elements. Here a – is the transmitting part; b – is the receiving part

An optical signal (code combination) using the code RZ-0.125 and denoted as $I_{in\ RZ-0.125}$, is fed to the divider (OD_1). The optical divider works as an optical power divider in half. After that one part of signal is fed to the delay line ODL_1 with a delay time of a quarter of the clock interval $T/4$ ($I_{out\ ODL_1\ (T/4)}$). The

second part of the signal propagates without delay. Then the both components of the signal are added, and at the output of the optical splitter in the adder mode (OD_2) a code signal with twice the number of units ($I_{\Sigma 1}$) is formed. This signal is fed to the splitter OD_3 . One of the components after leaving the divider passes through the optical delay line ODL_2 (delay time $T/2$), and on the output of the line ODL_2 signal is denoted as $I_{out\ ODL_2\ (T/2)}$ and adds with the undelayed part in the adder OD_4 . The number of units after such a forming process in the linear code combination will be four times greater than in the original. The generated and protected signal $I_{\Sigma 2}$ from the output OD_4 is fed to the linear tract. At the output of the linear tract, the signal is fed to the optical splitter OD_5 which divides it into two components.

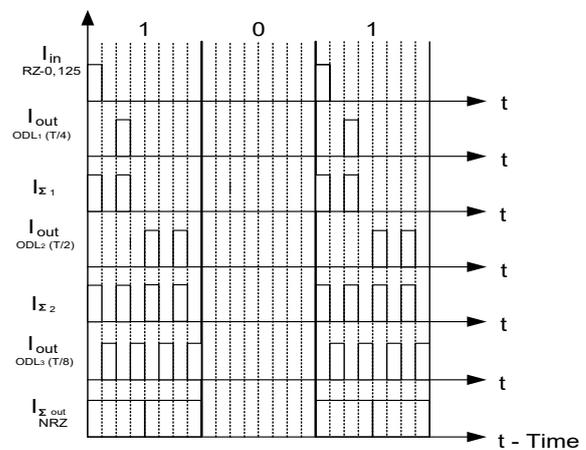


Fig. 3. Method of forming a linear code for the optical signal in the code RZ-0.125 when transmitting it on a linear tract and restoring the output signal in the NRZ code. I – is the designation of the intensity of the optical signal

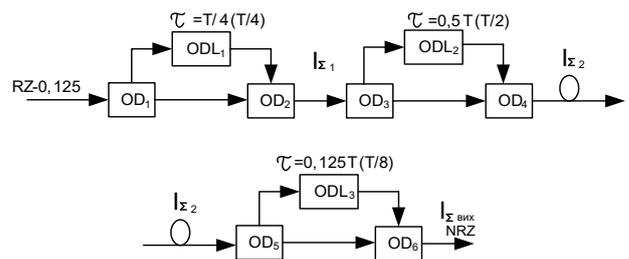


Fig. 4. Construction of a linear tract using linear encoding and decoding of the optical signal in the code RZ-0.125 using passive elements

One of these parts passes through the optical delay line ODL_3 (delay time $T/8$), and on the output of the line ODL_3 signal is denoted as $I_{out\ ODL_3\ (T/8)}$ and is added to the undelayed part of the code combination in the optical adder OD_6 . In this case, an optical signal is generated at the output of OD_6 , with code combinations that are adequate to the initial code

combinations, only in the NRZ code ($I_{\Sigma_{out NRZ}}$). This method can be generalized for the code RZ- $(1/2^{n+1})$, where n is a positive integer. Cases when $n = 1$ and $n = 2$ were discussed above. Construction of a linear tract with increasing number n will be performed at the receiving end as the connection of a number of elements that perform the division of the signal in half, the delay of one of the components to the corresponding part of the clock interval and their subsequent assembly. At the receiving end, the function of translating the linear code into the NRZ code will be performed by the same elements using the optical delay line for time $T/2^{n+1}$. The number of units in the code combinations of the optical linear tract will be 2^n times greater than in the original combinations.

The use of fairly inexpensive passive optical elements to mask optical linear codes significantly increases the reliability of the information protection process, compared with the use of active equipment.

Dynamic protection of information on computers optical networks. Given the fact that unauthorized access systems can be adapted to a certain fixed variant of linear codes, the paper proposes a dynamic system for switching variants of linear codes under a pseudo-random law. The block diagram of such a device is shown in Fig. 5. In this case, two systems of forming linear code combinations are used, which are switched according under pseudo-random law. To this end, the paper proposes to use two systems for generating linear codes based on input codes (e.g. RZ-0.25, RZ-0.125), as shown in Fig. 5. In this case, two types of linear code generator (LCG) operate on the transmitting end, forming code combinations based on signals from the transmission system in the codes RZ-0.25 and RZ-0.125, respectively.

The linear tract receives signals in the selected code in accordance with the control signals from the generator of pseudo-random time intervals (PRTG).

The signal from the outputs 1, 2 of the PRTG generator is fed to the control input of the optical switches OS_1 and OS_2 , operating in key mode. In this case, a linear code generator is selected for forming linear code combinations. The output signal PRTG from output 3 is supplied to the transmission system to generate a pilot signal when the linear code changes. Considering the fact that the signals at the outputs of the LCG generators must be mutually inverted – the corresponding information signal is received at the input of only one of the linear code generators (LCG_1 or LCG_2). After the formation of the linear code combination, it enters the optical divider OD_1 , which

operates in the mode of combining signals, and then enters the optical linear tract. At the receiving end, a linear code combination is supplied to the optical divider OD_2 and to the inputs of the optical switches OS_3 and OS_4 operating in key mode.

The control inputs of the switches receive a signal from the control device (CD), which is formed at the receiving end according to the pilot signal from the transmitting end. The signal from the CD provides the passage of a linear signal to the corresponding code generator NRZ ($CGNRZ_{1,2}$) and the subsequent passage of the code in NRZ format through the optical splitter OD_3 , operating in the mode of combining signals, to the input of the optical receiver. Thus, the proposed solution further protects information flows from unauthorized access at the level of linear optical computer communication structures.

The construction of protection is complicated by the appearance of additional elements. The switching speed of linear code variants is determined by the switching time of optical switches, among which should be noted switches based on the Mach-Zender interferometer (MZI) and electro-optical switches (EOS) [8].

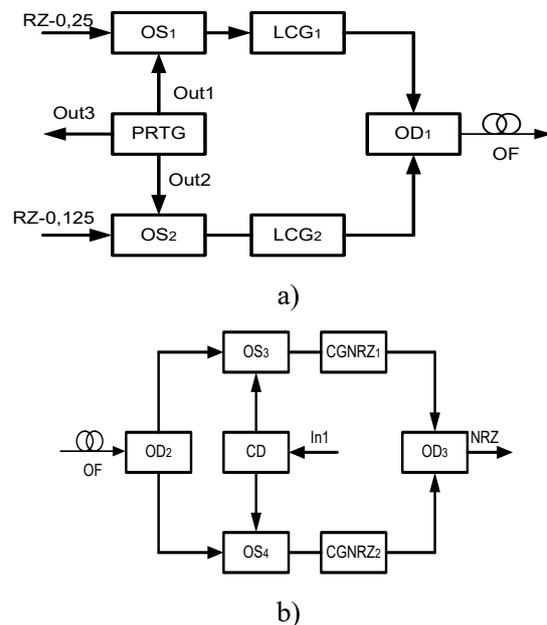


Fig. 5. Construction of a linear tract that uses dynamic information protection. Here a – is the transmitting part; b – is the receiving part

The switch based on the MZI is built on the basis of two series-connected optical splitters (branch factor 3 dB), which are interconnected by two optical waveguides of different optical lengths to create a phase difference at the output of II by changing the voltage U applied to one of shoulders of the interferometer Fig. 6.

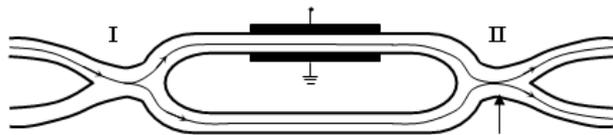


Fig. 6. Switch based on the Mach – Zender interferometer

Due to the fact that the optical waveguide to which the electric field is applied is made of an electro-optical material, such as lithium niobate (LiNbO_3), its refractive index changes with voltage. This changes the phase difference between the signals coming to the output II and there is a redistribution of signal power between the outputs of the interferometer so that it can be directed completely to one of the two outputs of the interferometer. When using only one output, the switch can operate in key mode.

Electro-optical switches also use directional couplers to generate light flux at one of the output ports. But this is done by changing the coupling factor between the optical waveguides. The coupling factor is changed by changing the refractive index of the splitter material in the optical coupling zone.

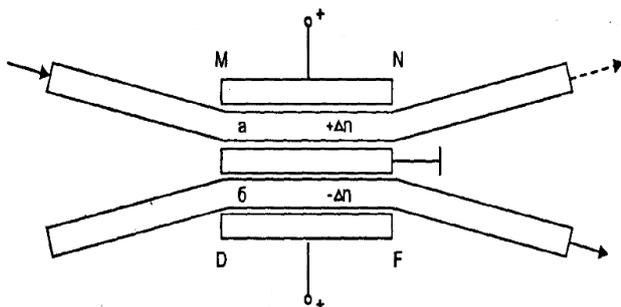


Fig. 7. Switch based on a directional splitter X – type.

Optical waveguides a and b in sections MN and DF are made of electro-optical material. Transparent electrodes are available on the outside between the optical waveguides. Due to the applied voltage, the refractive indices of optical waveguides can be changed. The division factor of the splitter also changes as a result. Electro-optical switches have a great advantage, which is manifested in the switching time, which reaches a value of the order of 10–100 ps, and it is manifested in small values of control voltages – 2.5–3 V. The advantage of electro-optical switches is also the ability to be made in integral-optical form.

Thus, the use of passive (splitters and delay lines) and active elements (switches) allows to create effective principles of dynamic protection

of information on the linear structures of computer optical networks. These principles combine both the formation of a number of types of protected linear codes and their regular rapid switching at random times. This significantly increases the level of protection, as it makes it virtually impossible to adequately and timely track and identify a specific type of code in real time.

If it is necessary to increase the level of protection, you can use the code RZ-0.0625 and the corresponding line code generator in addition to the input codes RZ-0.25 and RZ-0.125.

Increasing the level of protection of optical computer networks. Protection of optical paths based on codes RZ-0.25, RZ-0.125 was discussed above [9]. The work also considered a way to improve the level of security of optical computer networks based on the codes RZ-0.25 and RZ-0.125 mentioned above, by adding an additional channel using the code RZ-0.0625.

The diagram for constructing a code converter RZ-0.0625 into a linear code is shown in Fig. 8. It contains 4 optical splitters/combiners – OD_{1-4} and 4 optical delay lines – ODL_{1-4} .

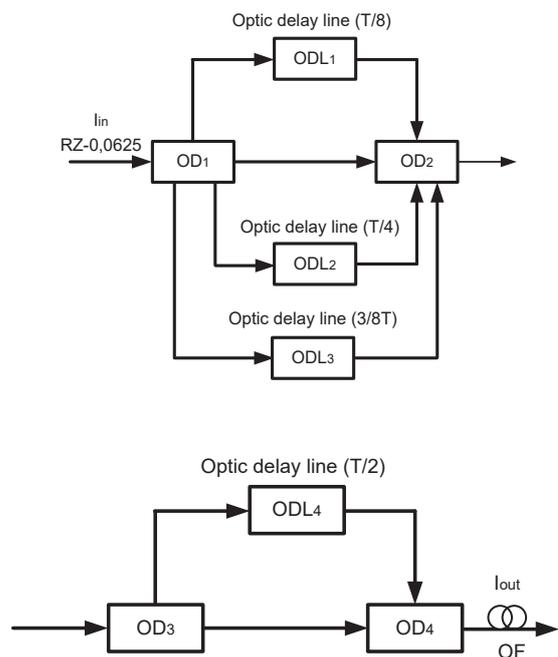


Fig. 8. Building RZ-0.0625 code converter to linear code

The type of signal at the output of the converter (input to the line) is shown in Fig. 9.

A general view of the linear tract that provides signal transmission using three protected channels (codes RZ-0.25, RZ-0.125, RZ-0.0625) is shown in Fig. 10.

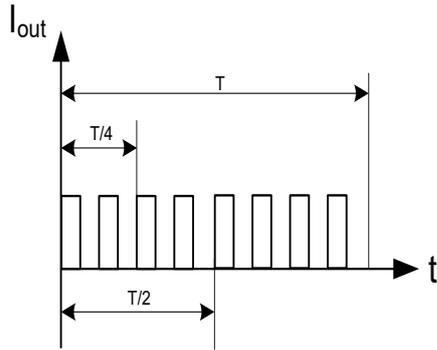


Fig. 9. Signal type at the output of the converter (input to the line)

The additional advantage of a 3-channel system compared to a 2-channel system is the reduction in the probability of determining the working channel after switching.

Conclusions. The proposed new method of dynamic protection of information on the linear structures of computer optical networks, allows increasing the security of these networks from unauthorized access. The main advantage of the method is the fast switching according to the pseudo-random law of a number of linear codes generated by a special algorithm using exclusively passive optical elements. The number of units in linear code combinations can significantly exceed the number of units of the main code. Due to this, adequate perception of the main code becomes impossible. However, in the case of constant use of a certain type of linear code, it is possible, as a result of analysis, to take measures to its adequate perception. In order to prevent such a situation, the paper proposes a dynamic principle of protection, which consists in

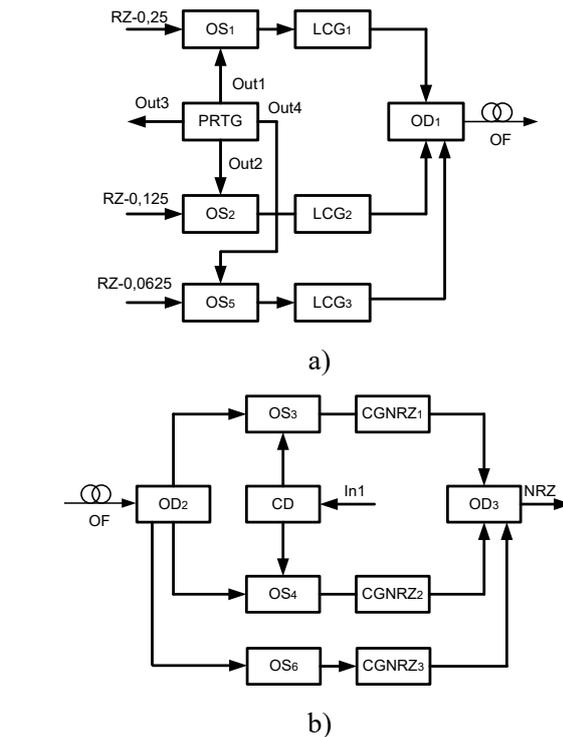


Fig. 10. General view of the linear path for transmitting three secure channels (codes RZ-0.25, RZ-0.125, RZ-0.0625). Here a – is the transmitting part; b – is the receiving part

the rapid switching of types of linear codes according to the pseudo-random law. Given the high switching speed, and the pseudo-random law of switching in time, adequate perception of information becomes almost impossible.

An additional advantage of the method is the ability to perform all the elements it includes in an integral-optical form.

Bibliography:

1. Каток В.Б. Волоконно-оптичний зв'язок: [для інж.-техн. працівників, студентів-зв'язківців]/В.Б. Каток, І.Е. Руденко, Є.Г. Ранський, П.М. Однорог; ПАТ "Укртелеком". – Київ : Логос, 2015. – 380 с.
2. Optical Fiber Telecommunications, Vol. IV A,B, ed. By I.P. Kaminov and Li Tingye, Academic Press, 2002, 1022 p.
3. Beller J., OTDRs and Backscatter Measurement, Ch. 11, Ed. Dericson D., Prentice Hall PRT, 1998.
4. Mahlke G., Gossing P. Fiber Optic Cables, Munich: Corning Cable Systems, MCD Corporate Publishing, 2001. – 304 p. ISBN 3-89578-162-2
5. Манько О.О. Захист лінійних споруд ВОЛЗ від несанкціонованого доступу з використанням металевих елементів оптичного кабелю Сучасний захист інформації. – 2012. – № 3. – С. 84–86.
6. Manko O. O. Using Passive Optical Devices for the Protection of Information in the Optical Communication Lines, in Proc. Third International Scientific-Practical Conference Problems of Infocommunications. *Science and Technology* (PIC S&T'2016), October 4-6, 2016, Kharkiv, Ukraine, pp. 73–74.
7. Optical fibres, cables and systems. ITU-T Manual, 2009. – 302 p. Printed in Switzerland, Geneva, 2009.
8. Корнійчук В.І., Мосорін П.Д. Волоконно-оптичні компоненти, системи передачі та мережі. – Одеса: Друк, 2001. – 354 с.: іл.
9. Kharlai Liudmila, Kunakh Nataliya, Sotnichenko Yulia, Konovalov Oleksiy, Skubak Olexandr, Manko Oleksandr. Dynamic Information Protection Method on Computer Optical Networks, *International Journal of Advanced Trends in Computer Science and Engineering*. 2020/Vol. 9, #3, May – June. pp. 3666–3670.

**Манько О.О., Харлай Л.О., Нікіфоренко К.Б., Коновалов О.Ю., Сотніченко Ю.О.,
Вакась В.І. ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ОПТИЧНОЇ КРИПТОГРАФІЇ
З ВИКОРИСТАННЯМ ПАСИВНИХ ОПТИЧНИХ ЕЛЕМЕНТІВ**

В запропонованій статті досліджено новий метод захисту інформаційних потоків, які передаються по лініям оптичного зв'язку. Він заснований на формуванні спеціальних лінійних кодів зі збільшеною кількістю одиниць. При цьому, для формування лінійних кодів та виконання зворотних операцій застосовуються пасивні оптичні елементи, а саме: волоконні розгалужувачі та лінії затримки на певну частину тактового інтервалу. Застосування спеціального лінійного коду значно підвищує рівень захисту інформації під час несанкціонованого доступу до лінійних споруд, а саме до оптичного кабелю. В той же час, при застосуванні фіксованого типу коду з'являється небезпека його перехоплення під час несанкціонованого доступу та наступного аналізу зі створенням відповідних заходів щодо дешифрування. Беручи це до уваги, в роботі запропоновано регулярну зміну лінійних кодів за псевдовипадковим законом. При цьому застосовуються такі активні пристрої, як оптичні комутатори. Надано структурну побудову пристроїв, що входять в склад лінійного оптичного тракту, і які є необхідними для переключення типів кодів, що застосовуються, з визначенням зв'язків між пасивним та активним обладнанням. В якості основних кодів, на базі яких формуються лінійні коди, запропоновано застосування оптичних кодів RZ (з поверненням до нуля). З метою підвищення ефективності рівня захисту в статті пропонуються динамічні переключення сформованих лінійних кодів. Таким чином, основою для функціонування запропонованого методу є швидке перемикавання за псевдовипадковим законом лінійних кодів, що генеруються за спеціальним алгоритмом з використанням оптичних елементів, які мають високу швидкість переключення. В даній роботі запропоновано використання трьох типів кодів. Приймальне обладнання також побудоване на декодуванні сформованих типів кодів за рахунок виключно пасивних елементів та пристроїв. При перемиканні передавального пристрою на інший тип коду відбувається підключення до виходу лінійного тракту відповідних входів приймального обладнання. Враховуючи високу швидкість перемикавання та псевдовипадковий закон перемикавання в часі, адекватне сприйняття інформації при використанні трьох типів кодів стає практично неможливим.

Ключові слова: оптичне волокно, несанкціонований доступ, захист інформації, оптичний розгалужувач, оптичний комутатор, оптична лінія затримки.

ІНФОРМАТИКА, ОБЧИСЛЮВАЛЬНА ТЕХНІКА ТА АВТОМАТИЗАЦІЯ

UDC 681.513.5:662.7:004.94

DOI <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2024.4/08>**Behlov Ya.I.**

Odessa Polytechnic National University

Таракмій О.С.

Odessa Polytechnic National University

COMPARISON OF EXTREME PYROLYSIS PLANT CONTROL SYSTEMS

Currently, the task of recycling household waste to obtain secondary energy resources is a very urgent task. This problem can be solved by using pyrolysis plants that process organic municipal solid waste into synthesis gas. The synthesis gas is then used as a fuel. The main problem with pyrolysis is the change in the composition of the raw material being processed. Changing the composition of the feedstock affects the composition of the synthesis gas and, consequently, its calorific value. Extreme control systems are used to ensure the production of synthesis gas in a given amount and with a maximum calorific value. The research and implementation of extreme control systems has been carried out for a long time, but no recommendations have been found on the use of such systems at a particular facility. The article considers typical extreme control systems when applied to a pyrolysis plant. Four control schemes are compared with each other. Each of them maintains a given pyrolysis temperature, providing the best conditions for the decomposition of organic compounds of different composition. A single-circuit system without determining the composition of the synthesis gas, a cascade system with correction for the composition of the synthesis gas, and two extreme control systems with direct determination of derivatives and with memory of the extreme are considered. The main advantages and disadvantages of each control system are identified. The advantage of control systems without measuring the calorific value of synthesis gas and cascade ACS is their simple adjustment and the absence of additional technical devices. The main disadvantage is the low quality of maintaining the calorific value of the synthesis gas. The advantage of a derivative-measuring ECS is the absence of control influence in the absence of perturbations in the feedstock composition. The disadvantage is the presence of differentiators that are highly sensitive to noise and interference. The advantage of a controller with extreme memory is a smaller deviation of the regulated parameter. The disadvantage is constant fluctuations in the system as a result of the search algorithm.

Key words: *pyrolysis plant, automatic control, extreme control system, simulation modeling.*

Formulation of the problem. The process of processing household waste into useful products by pyrolysis has attracted a lot of attention in recent years. Pyrolysis is a thermal decomposition process that converts organic materials into valuable products such as bio-coal, bio-oil and synthesis gas. The efficiency and productivity of pyrolysis systems largely depends on the control and regulation of various parameters. One of these is the composition of raw materials [1, 2].

The composition of raw materials means the types and proportions of organic materials used as raw materials in the pyrolysis process. It can vary greatly depending on the desired end products and the availability of biomass

resources. Common types of raw materials include wood, agricultural waste, and household waste, including plastics. Each raw material has its own unique chemical composition, which affects the pyrolysis process and the properties of the resulting products.

The composition of raw materials has a significant impact on the properties of the pyrolysis plant as a control object. It affects the thermal behavior of raw materials and chemical reactions occurring during pyrolysis. Understanding these effects is critical to optimizing the pyrolysis process and maximizing the yield of the desired products.

The non-linear properties of the pyrolysis plant mean the non-linear dependence between the

composition of raw materials and process variables, such as temperature, residence time and heating rate [4, 5, 6]. These properties are important for optimizing the pyrolysis process and maximizing the yield of the desired products. For example, the heating rate affects the distribution of products and the quality of bio-oil. A higher heating rate can lead to an increase in the yield of bio-oil, but a decrease in its quality.

Analysis of recent research and publications. As a result of the systematization of sources of information about automatic control systems of pyrolysis plants, it was found that the synthesis and research of optimal, particularly extreme control systems has been carried out for a long time. Many types of extreme control systems for non-linear objects have been developed, including pyrolysis installations.

The most complete statement of the principles of extreme regulation is given in the book by Draper and Lee [3]. This book proposes the classification of ECS according to the principle of receiving the input signal of the control device.

In order to solve the problems of low speed of gas production, low quality, low level of automation, complex furnace temperature control, and high energy consumption in the process of biomass gasification, the article [7] presents a system of automatic control of the furnace for the pyrolysis of gas mixture of carbon from biomass based on PLC. The control system implements a neural network and a fuzzy algorithm for processing data during its operation, as well as for adjusting parameters on the PLC online.

The paper [8] presents a fuzzy model of a predictive regulator for small-sized grate furnaces based on a biomass burning model. The resulting local predictive regulators are combined with membership functions to form a global nonlinear fuzzy control structure. The results of the closed circuit modeling of the fuzzy model of the predictive controller, the linear model of the predictive controller, and the PI control algorithm are presented and compared. Based on the results of the proposed fuzzy controller, its application, advantages and disadvantages are discussed.

The purpose of the study [9] is to study the behavior of thermal destruction and kinetics of microwave pyrolysis of biomass, which was improved and verified using a fuzzy PID control algorithm. Compared with the traditional PID control, the use of fuzzy PID control algorithm greatly improved the response speed of the system. Thus, more accurate temperature control using the fuzzy PID algorithm can reduce the experimental error and increase the efficiency of energy use during biomass conversion.

Research [10] is devoted to the development of a control system for the production of biomethanol by the method of thermochemical pyrolysis. The dynamic control system was designed and modeled using *Matlab*. The developed reference control model with a neural controller made it possible to achieve better control in manipulating the reaction temperature for a batch pyrolysis reactor.

The paper [11] considered the synthesis of automatic extremum search systems for a single-channel object, the model of which can be represented as a sequential connection of a nonlinear dynamic component and a static quality function with a well-defined minimum or maximum. The possibility of finding the extremum by the method of localization using the largest derivative of the output variable of the dynamic part of the object in feedback is discussed. Depending on the version of the implementation of such feedback, two main types of extreme systems are distinguished: single-circuit, in which the controller receives data about the gradient of the static characteristic, and two-circuit. In the latest systems, it is proposed to use regulators based on the localization method for preliminary stabilization of processes in the internal circuit containing the dynamic part. In the external circuit, the integral control law is used and the movement to the extremum with the specified dynamic quality is implemented, taking into account the gradient data. The simulation shows the features of the considered extreme systems.

An approach to the design of extremum-seeking control systems based on the localization method is given in [12]. A class of settings that represent a combination of nonlinear input dynamics and static nonlinearity with an extremum is considered. A feature of this work is the proposed approach to the design of a two-circuit system, in which the internal subsystem includes the dynamic part of the installation. The controller for this subsystem is based on the localization method and uses the derivatives of the output variable. This allows you to ensure processes according to the linear desired model. The external circuit contains a stabilized dynamic part ("equivalent" linear dynamics) and a static nonlinear map. Next, it is proposed to organize a gradient proportional regulator in the external circuit of the circuit. The search for the defining influence (extreme value of the non-linear initial static map) occurs with the required dynamic quality. The proposed system design approach is illustrated by a short simulation study.

In [13], an extremum-seeking control algorithm for discrete systems is given, applied to a class of installations that are a sequential combination of linear input dynamics, static nonlinearity with

extremum, and linear output dynamics. Using the theory of two-time averaging, we derive a soft sufficient condition under which the output of the installation exponentially converges to $O(\alpha^2)$ around an extreme value, where α is the magnitude of the modulation signal. The sufficient condition is related to the positive materiality of the linear parts of the installation, but only at the modulation frequency. The algorithm is illustrated by a short simulation study.

The analysis of literary sources shows that it is necessary to use multi-loop extreme control systems to control pyrolysis plants. But all studies are devoted to only one system proposed by the researcher. And the comparison is made only with typical regulation laws and there is no comparison between different extreme systems.

Task statement. In this way, the task of comparing typical extreme regulation systems is set with the aim of developing recommendations for use in managing the pyrolysis process of solid household waste.

Outline of the main material of the study. A conventional automatic control system (ACS) cannot solve the optimization problem. This happens because in a conventional ACS, the set value of the regulated parameter is always known and, therefore, it is always known in which direction it is necessary to change the regulating influence in order to eliminate the system error: the difference between the set value and the current value of the regulated parameter.

In contrast to conventional ACSs, the set value of the regulated parameter is not known in extreme control systems (ECS). Therefore, the task of ECS is fundamentally more difficult and consists in automatically finding such a value of the regulating influence that ensures the maximum (minimum) of the regulated value. In contrast to conventional automatic control systems, in ECS, the analysis of the state of the object at this moment in time does not make it possible to determine in which direction the control influence should be changed in order to obtain the desired result.

The task of ECS is to automatically find such a value of the adjustable parameter, about which only the features that distinguish this value from others are known in advance: either it is the maximum or the minimum of all possible values.

Extreme control systems are divided according to the principle used to determine the direction of movement to the extreme into the system:

1. Systems with extremum memory that respond to the difference between the largest output value reached at previous moments of time and the current output value y .

2. Systems responding to the sign or magnitude of the derivative dy/dx or dy/dt .

3. Systems with auxiliary modulation, which determine the direction of movement to the extremum based on the phase shift between the input and output oscillations of the object.

4. Step-type systems responding to the sign of output increments y .

According to the impact of the actuator (ACT) on the object, the ECS can be of continuous or discrete action. In continuous-action systems, during the operation of the regulator, the executive mechanism continuously changes the input x of the object. In discrete ECSs, the executive mechanism changes the input of the object after certain intervals of time. There are ECSs of a mixed type, which combine the properties of different systems of the above classification.

A characteristic feature of an extreme control system is continuous automatic monitoring of the mode parameters of the object that change (according to the value of the input value, which corresponds to the extremum of the output value), in the form of the result of an automatic search.

The magnitude of the system's "wobbling" in the process of searching for the extreme value of the initial value is an indicator of the ECS's operation in a stable mode. In the unstable mode, the time of entry into the zone of the specified yaw serves as an indicator of ECS operation.

Comparison of typical ECSs when controlling a pyrolysis plant

In order to achieve the goal, a simulation model of a pyrolysis plant [14, 15, 16, 17] with a variable structure of the ACS was created, which is shown in Figure 1.

Switches were used to study the ECS, which allow to observe the transient processes of regulation in the following modes:

1 – maintenance of the set pyrolysis temperature without the use of a feedback signal based on the quality of the pyrolysis synthesis gas;

2 – a cascade system for regulating the set temperature of pyrolysis using a proportional signal of the quality of pyrolysis synthesis gas;

3 – a cascade system for regulating the set temperature of pyrolysis using a ECS with measurement of the derivative function of the quality of the pyrolysis synthesis gas from the air consumption for pyrolysis;

4 – ECS with memorization of the extremum of the pyrolysis synthesis gas quality signal;

5 – ECS with measurement of the derivative function of the quality of pyrolysis synthesis gas from air consumption for pyrolysis.

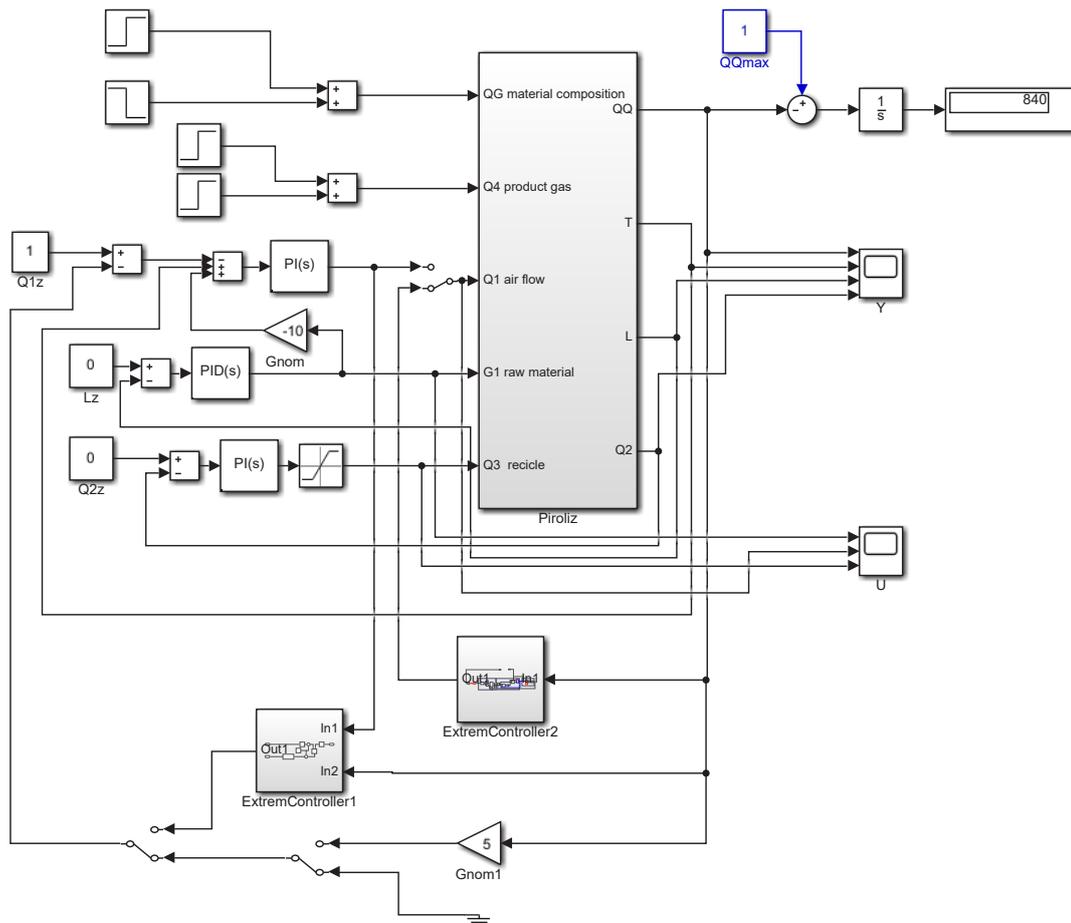


Fig. 1. Scheme of simulation modeling of a pyrolysis plant with a variable structure of the ECS

During the study, the following disturbances were applied to the input of the system:

- a change in the flow of pyrolysis synthesis gas (Q_2 , mol/s), which is supplied for further use, i.e. a change in the load of the pyrolysis plant;
- change in the initial composition of the raw materials that are fed to pyrolysis (Q_G).

Since the pyrolysis plant is a non-linear object, during the research, disturbances were applied either alternately or simultaneously. The task of the ECS is to maintain the given load Q_2 , while ensuring the maximum value of the quality of the pyrolysis synthesis gas, namely its calorific value Q_L^W . Also one of the important controllable parameters is the pyrolysis temperature T , as its change leads to a change in the composition of the product gas. Maintaining the correct temperature helps to maximize the yield of the target product, which has an economic value.

The simulation results are shown in Figures 2, 3 and 4.

As can be seen from Figure 6, the ECS provides the specified gas flow in any configuration.

$$J = \int_0^{t_p} (Q_{max} - Q) dt$$

Analysis of transient processes of pyrolysis temperature control shows that traditional systems, both single-circuit (1) and cascade (2), cope with the task of temperature maintenance. Short-term temperature deviations are observed when using ECS with derivative measurement (3). The increase in the deviation of the temperature from the zero value is explained by the change in the composition of the raw materials subject to pyrolysis.

It differs from other ECSs with extremum memory (4). For this system, the pyrolysis temperature deviation is maximum, on average up to 40°C. Also, constant fluctuations occur in the system, which is a characteristic feature of such systems.

The next indicator that was analyzed was the calorific value of synthesis gas, the transient processes of its regulation are shown in Figure 4.

Studies of transient processes, which are shown in the figure, show that the maintenance of the

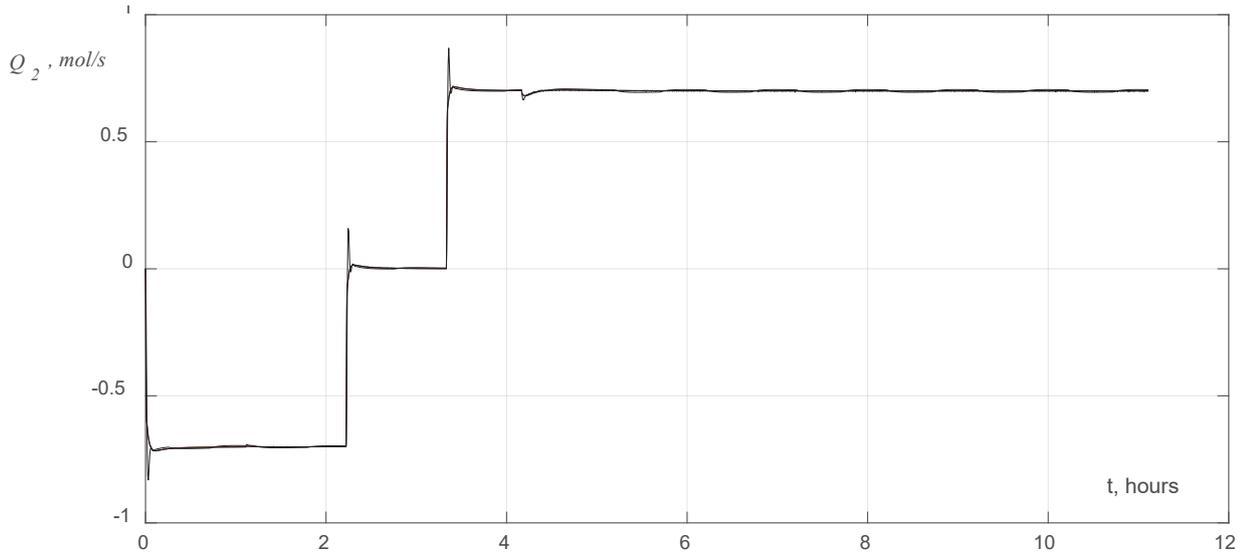


Fig. 2. Change in flow rate of pyrolysis synthesis gas (set load)

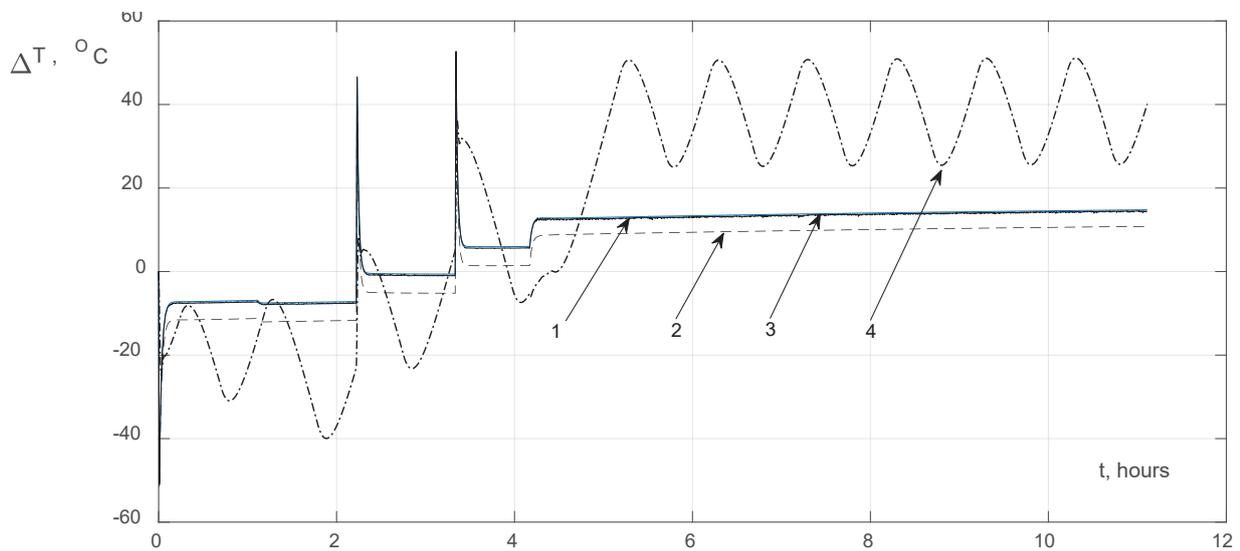


Fig. 3. Change in pyrolysis temperature

highest quality of synthesis gas takes place in the ECS with memory of the extremum (4). At the same time, a clear advantage of this system is observed when the composition of raw materials is changed. Control systems with other algorithms (1, 2, 3) compensate well only for load disturbances. At the same time, short-term deviations of the regulated parameter by rather large values (by 20–25%) are observed in the ECS with the measurement of derivatives (3).

As expected, the single-loop control system (1) shows the worst result of 10% static control error. For other systems, the static error is 7%.

The time of entry into the specified yaw zone for all systems can be considered the same because in

this case it is determined by the dynamic properties of the control object.

For a quantitative comparison of control systems, an integral quality indicator was determined:

Table 1

Comparison of integral quality indicator for different systems

| System | The value of <i>J</i> |
|---|-----------------------|
| Single-circuit (without measuring the calorific value of synthesis gas) | 1980 |
| Cascade without ECS | 1166 |
| ECS with measurement of derivatives | 1976 |
| ECS with extremum memory | 243 |

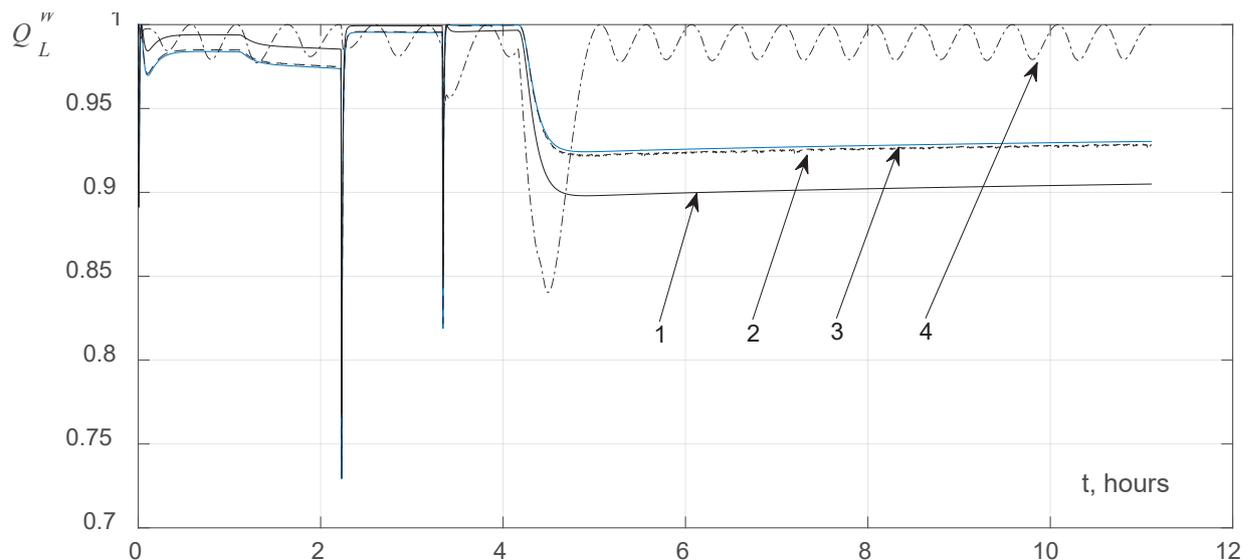


Fig. 4. Deviation of calorific value of synthesis gas

Conclusions. From the comparison of the considered control systems, it is clear that each of the ACSs has its own strengths and weaknesses.

First, it was found that, as an independent, ECS with the measurement of the derivative (5) was unsuitable due to large deviations of the regulated value under any disturbances. Therefore, in the future, this ECS was considered only as part of a cascade regulation system (3) for correcting the task of air consumption, which is supplied to pyrolysis.

The advantage of control systems without measuring the calorific value of synthesis gas and cascade ACS is their ease of setup, the absence of additional technical devices, both measurement and calculation. The main drawback is the low quality of maintaining the calorific value of synthesis gas, namely, a large static control error when the composition of raw materials is disturbed.

The advantage of ECS with measurement of derivatives is the absence of a controlling influence in the absence of disturbances in the composition of the raw materials. The disadvantage is the presence of differentiators that are highly sensitive to noise and interference.

The advantage of the ECS with memory of the extremum is a smaller deviation of the regulated parameter, namely the calorific value of the synthesis gas, a smaller value of the control influence (-0.8 ... 0.8 mol/s versus ± 20 mol/s in peak values and ± 0.7 mol/s in normal mode). The disadvantage is constant fluctuations in the system with a period of approximately 1800 seconds, as a result of the search algorithm.

Finally, it should be noted that the choice between these two extreme control systems depends on the specific requirements and limitations of the pyrolysis plant.

Bibliography:

1. Tarakhii O.S., Butenko O.V. Simulation model of solid waste as a control object. *Scientific notes of the Tavian National University named after V.I. Vernadsky. Series "Technical Sciences"*, Issue 32 (71), No. 2, 2021. P. 92–105. (in Ukrainian) DOI <https://doi.org/10.32838/2663-5941/2021.2-1/37>
2. A. Maksymenko. Development of Control System for Waste Pyrolysis Unit of Agricultural Complex With the Application of Fuzzy Logic (2021) *Technology Audit and Production Reserves*, 2021, No 4(2), P. 60.
3. Draper C.S., Li J.T. Principles of optimalizing control systems and an application to internal combustion engine. *ASME publications*, 1951.
- 4 A. Balestrino, F. Bassini and P. Pelacchi, "On the Control of a Pyrolysis Process," 2007 International Conference on Clean Electrical Power, Capri, Italy, 2007, P. 409–414, DOI: 10.1109/ICCEP.2007.384246.
5. M. Maksymov, K. Beglov, O. Maksymova, O. Maksymov. The method of finding the most natural structure of a biotank power plant. *Proceedings of Odessa Polytechnic University*, 2020, Issue 1(60), P. 82–95.
6. Aghbashlo, M., Tabatabaei, M., Nadian, M. H., Davoodnia, V., Soltanian, S. (2019). Prognostication of lignocellulosic biomass pyrolysis behavior using ANFIS model tuned by PSO algorithm. *Fuel*, 2019, Volume 253, P. 189–198. DOI: <http://doi.org/10.1016/j.fuel.2019.04.169>

7. Zhang, B., Xu, D., Hu, X., Liu, Y. (2020). Automatic control system of biomass pyrolysis gas carbon compound furnace based on PLC. 2020 *3rd World Conference on Mechanical Engineering and Intelligent Manufacturing (WCMEIM)*, 435–442. DOI: <http://doi.org/10.1109/wcmeim52463.2020.00098>
8. Bhler, L., Krail, J., Grtler, G., Kozek, M. (2020). Fuzzy model predictive control for small-scale biomass combustion furnaces. *Applied Energy*, 2020, Volume 276, 115339. DOI: <http://doi.org/10.1016/j.apenergy.2020.115339>
9. Bu, Q., Cai, J., Liu, Y., Cao, M., Dong, L., Ruan, R., Mao, H. (2021). The effect of fuzzy PID temperature control on thermal behavior analysis and kinetics study of biomass microwave pyrolysis. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 2021, Volume 158, 105176. DOI: <http://doi.org/10.1016/j.jaap.2021.105176>
10. Kasmuri, N. H., Kamarudin, S. K., Abdullah, S. R. S., Hasan, H.A., Som, A. M. (2019). Integrated advanced nonlinear neural network simulink control system for production of biomethanol from sugar cane bagasse via pyrolysis. *Energy*, 2019, Volume 168, P. 261–272. DOI: <http://doi.org/10.1016/j.energy.2018.11.056>
11. Frantsuzova G. Features of different types of automatic extremum seeking systems based on localization method. *Optoelectronics, Instrumentation and Data Processing*. 2012. V. 48. P. 438–446.
12. Frantsuzova G. A. Design of Two-Loops Extremum Seeking System by Means of Localization Method. *Proc. of the IASTED Intern. Conf. "Automation, Control and Information Technology (ACIT-in 2005). Anaheim-Calgary-Zurich: ACTA Press, 2005. P. 415–419.*
13. Joon-Young C, Miroslav K., Kartik B. Ariyur, Jin S. Lee. Extremum Seeking Control for Discrete-Time Systems. *IEEE Transactions on automatic control*. 2002. V. 47. N. 2. P. 318–323.
14. Maksymov M., Brunetkin O., Beglov K., Alyokhina S., Butenko O. Automatic Control for the Slow Pyrolysis of Organic Materials with Variable Composition. *Advanced Control Systems: Theory and Applications. Series in Automation, Control and Robotics River Publishers*. 2021. Chapter 14. P. 397–430. ISBN:978-87-7022-341-6 (Hardback), ISBN:978-87-7022-340-9 (Ebook).
15. Kondratenko, Y.P., Chikrii, A.A., Gubarev, V.F., Kacprzyk, J. (Eds). *Advanced Control Techniques in Complex Engineering Systems: Theory and Applications*. Dedicated to Professor Vsevolod M. Kuntsevich. Studies in Systems, Decision and Control, Vol. 203. Cham: Springer Nature Switzerland AG, 2019.
16. Kuntsevich, V.M., Gubarev, V.F., Kondratenko, Y.P., Lebedev, D.V., Lysenko, V.P. (Eds). *Control Systems: Theory and Applications*. Series in Automation, Control and Robotics, River Publishers, Gistrup, Delft, 2018. https://www.riverpublishers.com/book_details.php?book_id=668
17. A. Maksymenko. Model of straw composition fuzzy clusterization and classification for selection of best technological parameters for pyrolysis. (2021) *Science, Theory and Practice. Abstracts of International Scientific and Practical Conference*, Tokyo, Japan 2021.

Беглов Я.І., Тарахтій О.С. ПОРІВНЯННЯ ЕКСТРЕМАЛЬНИХ СИСТЕМ РЕГУЛЮВАННЯ ПІРОЛІЗНОЮ УСТАНОВКОЮ

У теперішній час задача переробка побутових відходів з метою отримання вторинних енергоресурсів є дуже актуальною задачею. Таку задачу можна вирішити за допомогою піролізних установок, які переробляють органічні тверді побутові відходи у синтез-газ. У подальшому синтез-газ використовується як паливо. Основною проблемою при піролізі є зміна складу сировини яка обробляється. Зміна складу сировини впливає на змінення складу синтез-газу і, відповідно, на його теплотворну здатність. Для забезпечення вироблення синтез-газу у заданій кількості та з максимальною теплотворною здатністю використовують системи екстремального регулювання. Дослідження та впровадження систем екстремального регулювання проводиться доволі давно, але не знайдено жодних рекомендацій щодо застосування таких систем на конкретному об'єкті. В статті розглянуто типові системи екстремального регулювання при застосуванні їх у піролізній установці. Між собою порівняні чотири схеми регулювання. Кожна з них підтримує задану температуру піролізу, забезпечуючи найкращі умови для розкладення органічних сполук різного складу. Розглянуті одноконтурна система без визначення складу синтез-газу, каскадна система з корегуванням за складом синтез-газу, та дві екстремальні системи регулювання з безпосереднім визначенням похідних та з запам'ятовуванням екстремуму. Визначені основні переваги та недоліки кожної системи регулювання. Перевагою систем керування без вимірювання теплотворної здатності синтез-газу та каскадної САР є їхня простота налагодження, відсутність додаткових технічних пристроїв. Основний недолік – низька якість підтримання теплотворної здатності синтез-газу. Перевага СЕР з вимірюванням похідних – відсутність керуючого впливу за відсутності збурень складом вихідної сировини. Недолік – наявність диференціаторів, які мають високу чутливість до шумів і перешкод. Перевага СЕР з запам'ятовуванням екстремуму – менше відхилення регульованого параметра. Недолік – постійні коливання в системі в наслідок роботи пошукового алгоритму.

Ключові слова: піролізна установка, автоматичне регулювання, екстремальна система регулювання, імітаційне моделювання.

Богза М.С.

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

Волощук В.А.

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

ЗАСТОСУВАННЯ МЕТОДІВ МАШИННОГО НАВЧАННЯ У ЗАДАЧАХ МОДЕЛЮВАННЯ ДИНАМІКИ ТЕПЛОНАСОСНИХ УСТАНОВОК

Сучасні тенденції в енергозбереженні та підвищенні енергоефективності ставлять перед дослідниками та інженерами завдання удосконалення технологій, які застосовуються в системах опалення, вентиляції та кондиціонування повітря. Одним з ключових напрямів у цій галузі є оптимізація роботи теплонасосних установок (ТНУ), що забезпечують високий коефіцієнт корисної дії та економію енергоресурсів. В статті розглядаються сучасні підходи до моделювання ТНУ, зокрема аналітичні методи та методи машинного навчання, для підвищення їх ефективності та продуктивності.

Традиційні аналітичні методи, реалізовані в програмних пакетах, таких як MATLAB, COMSOL або Python, дозволяють створювати детальні моделі ТНУ на основі фізичних принципів. Ці моделі враховують різні параметри та умови роботи системи, що забезпечує можливість проведення детального аналізу та прогнозування її поведінки. Однак, з розвитком технологій штучного інтелекту, зокрема машинного навчання, з'явилася можливість застосування нейронних мереж для моделювання таких нелінійних систем, як ТНУ. У статті проаналізовано використання моделей машинного навчання для моделювання динамічних процесів в ТНУ, показано їх ефективність у прогнозуванні енергоспоживання та продуктивності системи.

Результати останніх досліджень демонструють, що моделі машинного навчання можуть досягати високої точності прогнозування параметрів роботи ТНУ, таких як теплова потужність, споживання електричної енергії, коефіцієнт трансформації (COP) та виявлення несправностей. Використання чистих та синхронізованих даних, які представляють різні умови експлуатації, є важливим аспектом успішного застосування таких моделей в алгоритмах керування ТНУ.

Метою даного дослідження є розробка та порівняння аналітичної моделі ТНУ, створеної на базі MATLAB, з моделями машинного навчання. У процесі дослідження визначено переваги та недоліки кожного з підходів, а також запропоновані рекомендації щодо їх використання для оптимізації роботи теплових насосів. Розроблені комп'ютерні моделі ТНУ були провалідовані на основі реальних експериментальних даних, що забезпечило високу точність моделювання.

Висновки дослідження підкреслюють, що застосування моделей машинного навчання, зокрема ANN та Random Forest, дозволяє значно скоротити час розрахунків та підвищити гнучкість системи при обробці різноманітних сценаріїв та умов експлуатації ТНУ. Це відкриває нові можливості для оптимізації роботи теплових насосів та підвищення їх енергоефективності, що є важливим аспектом в умовах сучасних вимог до енергозбереження та екологічної безпеки.

Ключові слова: теплонасосні установки (ТНУ), аналітичні моделі, машинне навчання, нейронні мережі, випадкові ліси, прогнозування, оптимізація

Постановка проблеми. Сучасні тенденції в енергозбереженні та підвищенні енергоефективності вимагають удосконалення технологій, які використовуються в системах опалення, вентиляції та кондиціонування повітря. Одним із важливих аспектів цього процесу є оптимізація роботи теплонасосних установок (ТНУ). Такі установки можуть забезпечити високий коефіцієнт корисної дії та економію енергоресурсів, що робить їх привабли-

вими для широкого застосування у різних галузях [1, 2]. Традиційно для моделювання ТНУ використовуються аналітичні методи, реалізовані в програмних пакетах, таких як MATLAB, COMSOL або Python. Ці методи базуються на фізичних принципах і дозволяють створювати детальні моделі систем, враховуючи різні параметри та умови роботи. Однак, з розвитком технологій штучного інтелекту, з'явилася можливість застосування моделей

машинного навчання для моделювання таких нелінійних систем, як ТНУ [3].

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Дослідники проаналізували використання штучних нейронних мереж (ANN) для моделювання динамічних процесів ТНУ, демонструючи їх ефективність у прогнозуванні енергоспоживання та продуктивності систем [4]. Розроблені моделі А та В на основі ANN показали високу точність в прогнозуванні параметрів роботи теплових насосів, таких як теплова потужність, споживання електричної енергії, коефіцієнт трансформації (COP) та виявлення несправностей. Модель А відзначається здатністю швидко виявляти відмови компресора та несподівані зупинки, що робить її перспективним інструментом для системного виявлення несправностей. Модель В виявилася відмінним інструментом для прогнозування енергоспоживання та COP, що допомагає виробникам покращувати параметри ТНУ, а власникам будівель – моніторити продуктивність. Важливим аспектом успішного застосування ANN є наявність чистих та синхронізованих даних, які представляють різні умови експлуатації. Стаття підкреслює, що ANN забезпечує швидкий і точний метод аналізу динаміки наявних даних, що є перевагою порівняно з традиційними фізичними моделями, які часто вимагають більш складного підходу та додаткових даних від виробників.

В роботі [5] проаналізовано використання нейронних мереж для оптимізації режимів роботи циркуляційного насоса в складі ТНУ на основі даних про джерело тепла та навантаження. Модель штучної нейронної мережі (ANN) була розроблена для прогнозування оптимальної швидкості води, що дозволило покращити продуктивність системи без значного збільшення витрат або зміни основних компонентів існуючої системи кондиціонування. Використання синтетичних наборів даних навантаження у вигляді часових рядів для навчання моделі ANN забезпечило високу точність прогнозування, навіть за суворих погодних умов. Модель продемонструвала надійні результати завдяки алгоритму зворотного розповсюдження помилки, що дозволило точно контролювати швидкість потоку води в межах рекомендованого діапазону. Збільшення COP на 0.88% і 6.23% відповідно при низькій швидкості води та використанні насоса зі змінною швидкістю забезпечило економічну ефективність та потенціал для зменшення енергоспоживання.

У статті [6] досліджено ефективність використання методів випадкових лісів (RF) та нейронних

мереж з зворотною передачею помилки для прогнозування продуктивності ґрунтових теплових насосів. Дослідження базується на двох роках експлуатаційних даних, зібраних в освітній будівлі у холодній зоні Китаю. Основні показники продуктивності, такі як коефіцієнт трансформації та енергетичний коефіцієнт ефективності, були успішно спрогнозовані за допомогою Random Forest моделі з середньою відносною помилкою менше 5%. Порівняння моделей показало, що Random Forest має переваги в точності та швидкості у порівнянні з нейронною мережею зворотного поширення. Зокрема, Random Forest модель виявилася менш чутливою до змін кількості вхідних змінних і забезпечила високу точність навіть при їх зменшенні. Це дослідження підтверджує, що Random Forest є потужним інструментом для прогнозування та управління продуктивністю систем ґрунтових теплонасосних установок, сприяючи покращенню їх енергоефективності та зниженню експлуатаційних витрат.

У статті [7] досліджено використання моделей машинного навчання для прогнозування коефіцієнта трансформації (COP) систем теплових насосів. Зібрані дані експлуатації теплових насосів були використані для розробки моделей штучної нейронної мережі (ANN), методу опорних векторів (SVM), випадкового лісу (RF) та алгоритму k-найближчих сусідів (KNN). Результати показали, що ANN модель забезпечила найвищу точність прогнозування з відносною помилкою –3.6% і найшвидший час обчислення, задовольняючи критерії ASHRAE. Використання ANN моделі в системі автоматизації будівель підтвердило її ефективність та придатність для реального часу моніторингу продуктивності, що підкреслює її потенціал для підвищення енергоефективності теплових насосів.

Актуальність даного дослідження полягає в порівнянні ефективності аналітичних моделей на базі MATLAB та моделей машинного навчання для моделювання ТНУ. Використання таких моделей дає можливість враховувати складні взаємозв'язки між параметрами системи та забезпечити точне передбачення її поведінки за різних умов експлуатації при цьому оптимізуючи використання обчислювальних ресурсів. Це відкриває нові можливості для оптимізації роботи теплових насосів та підвищення їх енергоефективності.

Постановка завдання. Метою даного дослідження є розробка та порівняння аналітичної моделі теплового насоса, створеної на базі MATLAB, з моделями машинного навчання.

У процесі дослідження будуть визначені переваги та недоліки кожного з підходів, а також запропоновані рекомендації щодо їх використання для оптимізації роботи теплових насосів.

Виклад основного матеріалу. Принцип аналітичного моделювання роботи теплового насосу базується на використанні математичних рівнянь, що описують фізичні процеси в кожному з компонентів системи. Аналітична модель враховує термодинамічні властивості робочого тіла, рівняння теплового балансу для випарника та конденсатора, а також параметри компресора і розширювального клапана. Такі моделі дозволяють проводити детальний аналіз роботи теплового насосу, прогнозувати його поведінку за різних умов експлуатації та оптимізувати його налаштування для підвищення енергоефективності. На рис. 1 представлена схема теплової насосної установки типу «вода-вода».

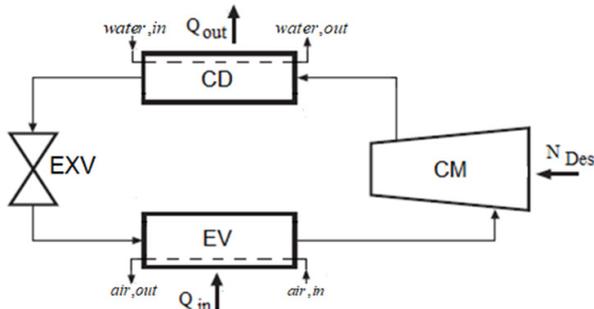


Рис. 1. Розрахункова схема теплонасосної установки

Система складається з чотирьох основних компонентів: конденсатора (CD), випарника (EV), компресора (CM) та дросельного вентиля (EXV). Вода надходить до конденсатора через вхідний

патрубок (water,in), де вона нагрівається і виходить через вихідний патрубок (water,out), передаючи теплоту Q_{out} . Робоче тіло, яке стискається у компресорі (CM), підвищує свою температуру і тиск, після чого надходить до конденсатора, де відбувається віддача тепла воді.

Після конденсатора робоче тіло проходить через дросельний вентиль (EXV), де його тиск і температура знижуються. Потім робоче тіло потрапляє до випарника (EV), де воно поглинає тепло Q_{in} від води, що надходить через вхідний патрубок (water,in) і виходить через вихідний патрубок (water,out). Таким чином, тепло, відібране із води у випарнику, переноситься і віддається у конденсаторі, забезпечуючи ефективне нагрівання. Схема демонструє основні етапи процесу передачі тепла в тепловій насосній установці, підкреслюючи роль кожного компонента у цьому циклі. На рис. 2 зображено комп'ютерну модель Simulink, яка використовує рівняння теплового балансу для моделювання динаміки теплового насосу [8, 9].

Розроблену комп'ютерну модель теплової насосної установки було провалідовано на основі реальних експериментальних даних, що забезпечило високу точність моделювання. Результати валідації показали, що середня абсолютна відсоткова помилка (MAPE) склала 10,5%, що задовольняє умови дослідження і підтверджує адекватність моделі для використання у практичних застосуваннях.

Основною перевагою такого підходу є висока точність моделювання, що дозволяє проводити детальний аналіз та оптимізацію роботи теплової насосної установки. Проте, значним недоліком є високі вимоги до обчислювальних ресурсів. Як показано у таблиці 1, проміжок часу моделю-

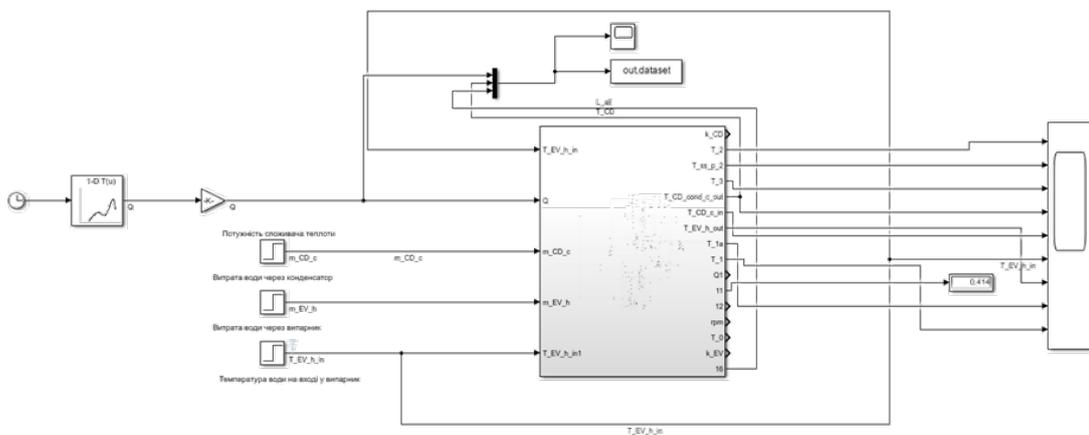


Рис. 2. Модель ТНУ в середовищі Simulink

вання безпосередньо впливає на час розрахунку: для моделювання періоду тривалістю 6000 секунд потрібно 470 секунд обчислювального часу, а для моделювання одного місяця – дві доби обчислювального часу. Це вказує на необхідність використання потужних обчислювальних систем для моделювання довготривалих процесів, таких як опалювальний період, де може виникати помилка розрахунку через обмеження ресурсів.

Таблиця 1

Тривалість процесу моделювання

| Проміжок часу моделі (Stop time), с. | Час розрахунку з кроком 0.5 с |
|--------------------------------------|-------------------------------|
| 120 | 11 |
| 600 | 85 |
| 6000 | 470 |
| 1 місяць | 2 доби |
| Опалювальний період | Помилка розрахунку |

Для пришвидшення часу моделювання теплової насосної установки буде розглянуто кілька альтернативних моделей машинного навчання, зокрема метод random forest [10, 11] та рекурентні нейронні мережі [12].

На рис. 3 зображено архітектуру методу Random Forest, який використовується для задач моделювання та прогнозування. Метод Random Forest складається з множини дерев рішень, кожне з яких навчається незалежно на різних підмножинах даних.

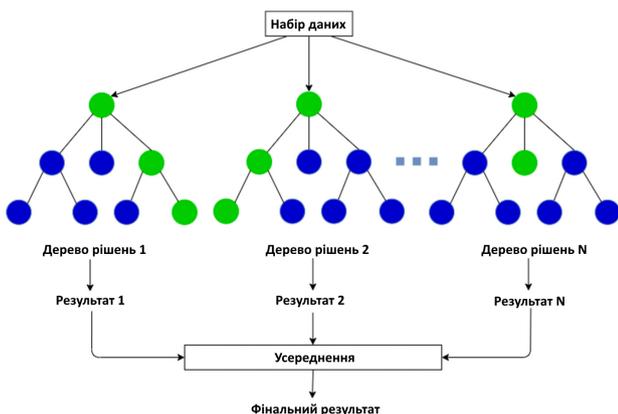


Рис. 3. Схематичне зображення алгоритму Random Forest [8, 9]

Процес починається з того, що початковий датасет ділиться на декілька підмножин, кожна з яких використовується для навчання окремого дерева рішень. Кожне дерево рішень проходить через процес навчання, створюючи свої унікальні гілки і вузли.

Фінальний результат обчислюється шляхом об'єднання всіх результатів окремих дерев. Для класифікаційних задач кінцевий клас визначається тим, який отримав найбільшу кількість голосів від окремих дерев. Для регресійних задач остаточне передбачення є середнім значенням усіх передбачень дерев.

Ця архітектура дозволяє моделі Random Forest зменшити ймовірність перенавчання і підвищити загальну точність прогнозування, об'єднуючи в собі сильні сторони багатьох окремих дерев.

Рекурентні нейронні мережі (RNN), зокрема їх варіанти LSTM (Long Short-Term Memory) [13, 14] та GRU (Gated Recurrent Unit) [15, 16], відомі своєю здатністю обробляти послідовності даних і виявляти залежності у часових рядах. Вони можуть бути використані для передбачення динаміки теплових процесів на основі історичних даних, що значно прискорює моделювання у порівнянні з традиційними методами.

Впровадження цих моделей дозволить не лише скоротити час розрахунків, але й підвищити гнучкість системи при обробці різноманітних сценаріїв та умов експлуатації теплової насосної установки. Такий підхід забезпечить більш ефективне використання обчислювальних ресурсів та розширить можливості аналізу та оптимізації системи в реальному часі.

На рисунку 4 зображено набір даних, згенерований за допомогою моделі Simulink та використаний для тренування моделей машинного навчання. Цей набір даних включає ключові параметри системи: Q – теплову потужність, необхідну для забезпечення тепловою енергією споживача (будинку); T_{CD} – температуру теплоносія на виході теплової насосної установки (ТНУ); та L_{all} – електричну потужність, споживану компресором. Період моделювання склав один місяць, що зайняло два дні обчислювального часу моделі Simulink. Частота запису даних становила 0,5 секунди.

Для прогнозування споживання електричної енергії ТНУ, було використано метод випадкового лісу (RandomForestRegressor). Даний підхід дозволяє створити ансамбль рішень шляхом побудови множини дерев рішень, що значно покращує точність прогнозів порівняно з одиничними моделями.

Для оптимізації гіперпараметрів моделі було використано метод GridSearchCV [17], який здійснює перебір заданих значень параметрів з подальшим вибором найбільш оптимальних. Зокрема, в даному дослідженні було обрано два ключові параметри: кількість дерев у лісі

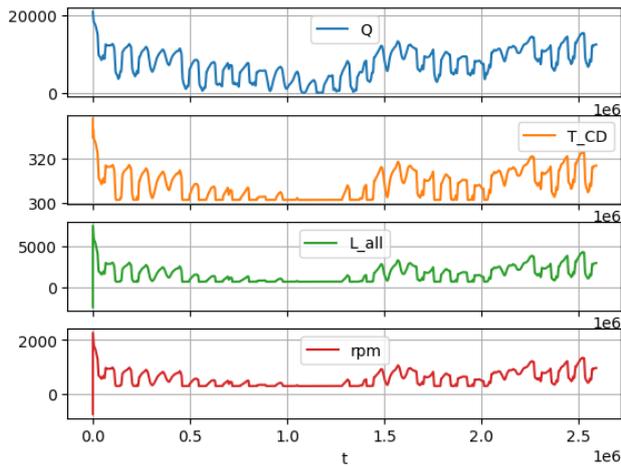


Рис. 4. Набір тренувальних даних

($n_estimators$) та максимальна глибина дерев (max_depth). Значення параметрів, що розглядалися для $n_estimators$, були наступні: 100, 200, 500 та 1000, а для max_depth – None, 10, 20 та 30.

Процес оптимізації моделі здійснювався на основі крос-валідації, що дозволяє зменшити ймовірність перенавчання моделі та забезпечити більш надійні результати. Як оцінку точності моделі було обрано корінь середньоквадратичної помилки (RMSE) [18], оскільки вона є стандартною метрикою для задач регресії та добре підходить для порівняння точності різних моделей.

Результати пошуку оптимальних параметрів показали, що найкращі значення були досягнуті при $max_depth = 30$ та $n_estimators = 100$. Модель з цими параметрами була навчена на тренувальному наборі даних і використана для прогнозу-

вання на валідаційному наборі. Значення RMSE на валідаційному наборі склало 258 Вт, що свідчить про задовільну точність моделі в умовах даного дослідження. Час тренування склав 16 хвилин та 10 секунд. Один із тестувальних сценаріїв зображено на рис. 5.

Отримані результати демонструють ефективність методу випадкового лісу для прогнозування споживання електричної енергії теплової насосної установки, забезпечуючи адекватну точність при відповідних налаштуваннях параметрів моделі.

Для прогнозування споживання електричної енергії ТНУ залежно від теплового навантаження була розроблена модель на основі Long Short-Term Memory (LSTM) – типу рекурентної нейронної мережі (RNN). Модель LSTM вибрана через її здатність враховувати довгострокові залежності в часових рядах, що є критично важливим для точного прогнозування у складних динамічних системах, таких як теплонасосні установки.

Для побудови моделі LSTM, дані були нормалізовані шляхом обчислення середнього значення та стандартного відхилення для тренувальної частини набору даних.

Потім, підготовлені дані були організовані у вигляді тензорів, з яких сформовані набори даних для тренування та валідації. Вони були кешовані, перемішані та розділені на підмножини для подальшого тренування моделі [19, 20, 21].

На Рис. 6 представлена архітектура нейронної мережі яка була створена за допомогою ресурсу [22]. Вона складається з двох прихованих шарів, де кожен шар складається з LSTM (Long Short-Term Memory) нейронів. Вхідний шар мережі складається з 6 нейронів, які отримують початкові дані.

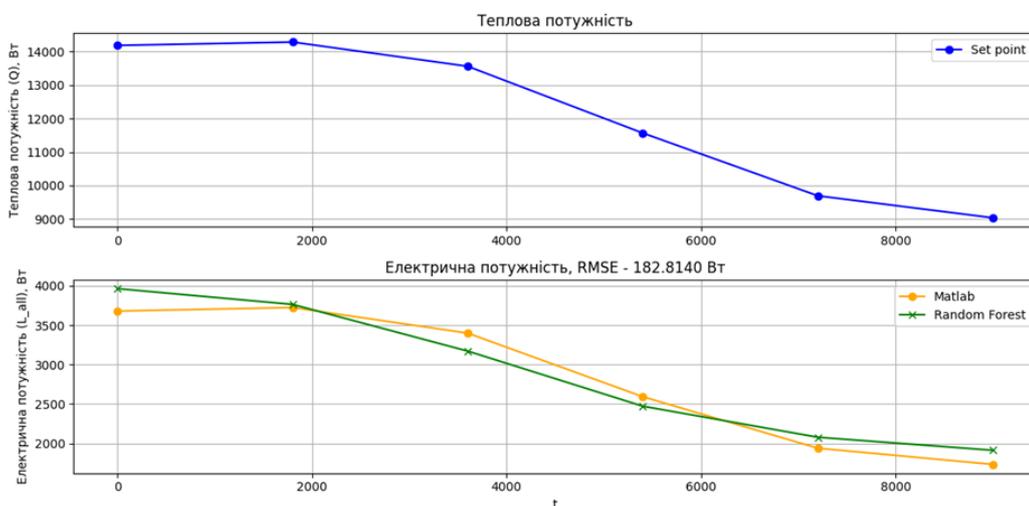


Рис. 5. Використання моделі RandomForest

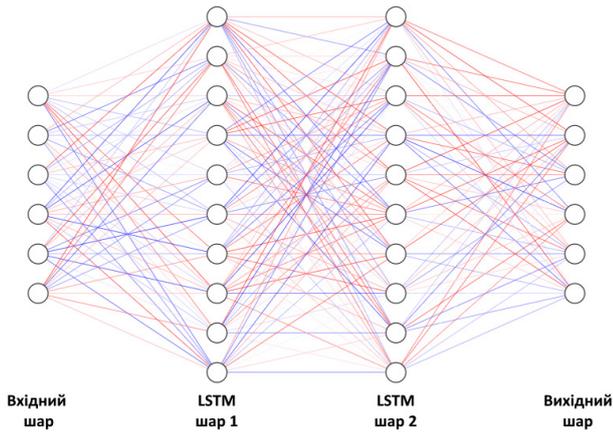


Рис. 6. Архітектура нейронної мережі

Ці нейрони з'єднані з 10 нейронами першого прихованого шару, що моделює складні часові залежності у вхідних даних. Далі, перший прихований шар з'єднаний з другим прихованим шаром, який також містить 10 нейронів. Другий прихований шар з'єднаний з вихідним шаром, який складається з 6 нейронів, що генерують кінцеві результати мережі. Така архітектура дозволяє ефективно обробляти послідовності даних, зберігаючи інформацію про попередні стани і використовуючи її для покращення точності прогнозування.

Модель була скомпільована з використанням оптимізатора Adam[23] і функції втрат MSE (mean squared error). Час тренування склав 55 хвилин та 2 секунди. Значення RMSE на валідаційному наборі склало 37 Вт, що свідчить про високу точність моделі в умовах даного дослідження. Один із тестувальних сценаріїв зображено на рис. 7.

На рис. 8 зображено використання моделі RandomForest та LSTM на одному тестувальному сценарії. Показник RMSE для RandomForest моделі є 48 Вт, а для LSTM 25 Вт.

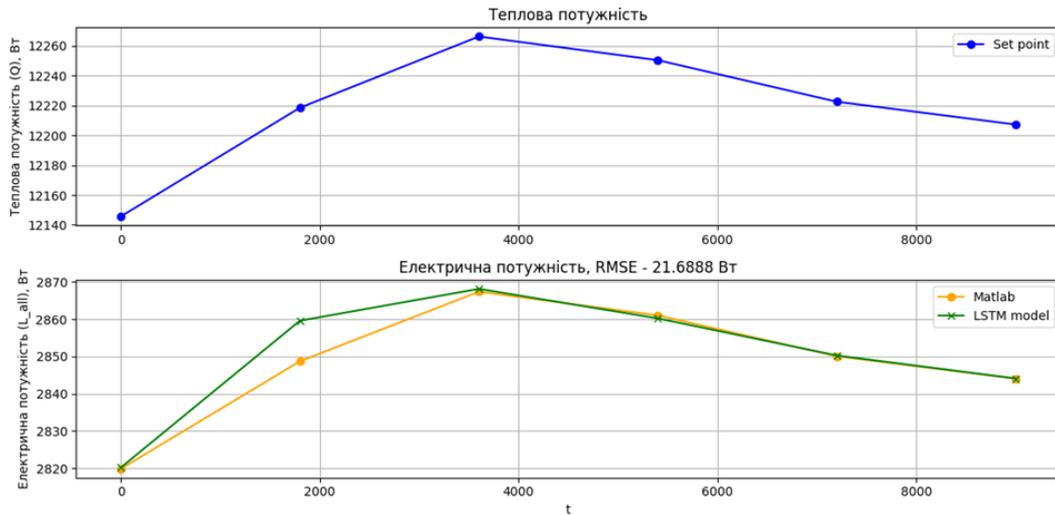


Рис. 7. Використання моделі LSTM

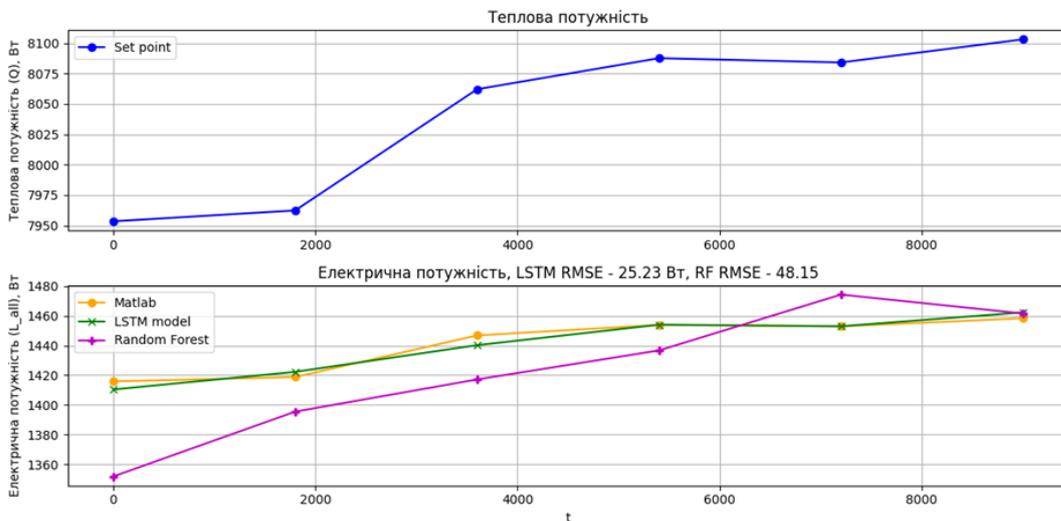


Рис. 8. Тестування обох моделей на валідаційному наборі даних

Висновки. В результаті дослідження було розроблено дві моделі з використанням методів машинного навчання: Random Forest та LSTM (Long Short-Term Memory). Обидві моделі оцінювалися за критеріями швидкості тренування, точності та здатності до оптимізації.

Модель Random Forest продемонструвала швидкий час тренування завдяки наявності вбудованих інструментів для оптимізації параметрів. Середній час роботи цієї моделі для 10 тестових сценаріїв склав лише 0.005 секунди. Це робить її надзвичайно ефективною для швидкого розгортання та використання в реальних умовах.

У свою чергу, модель на базі LSTM вимагала значно більше часу для підготовки даних та самого процесу тренування. Середній час роботи

цієї моделі для 10 тестових сценаріїв склав 0.35 секунди. Незважаючи на це, LSTM забезпечує значно вищу точність прогнозування.

При оцінці на валідаційному наборі даних модель Random Forest досягла RMSE на рівні 258 Вт, тоді як модель LSTM показала значно кращий результат з RMSE на рівні 37 Вт. Це свідчить про те, що LSTM значно точніше прогнозує залежність електричної енергії від теплового навантаження в системі теплового насосу.

З урахуванням показників точності та швидкодії, модель LSTM була обрана як оптимальна для задач розрахунку та моделювання залежності електричної енергії від теплового навантаження в теплонасосній установці. Це рішення базується на її високій точності, незважаючи на більший час тренування та складність підготовки даних.

Список літератури:

1. Vincenzo Bianco, Federico Scarpa, Luca A. Tagliafico. *Applied Thermal Engineering*. 2017. № 114. С. 938–947. DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2016.12.058.
2. Xing, C., Ding, Q., Jiang, A., Cheng, W., & Zhou, D. 2015. Dynamic operational optimization of air source heat pump heating system with the consideration of energy saving. *IFAC-Pap*. 2015. Т. 48. № 8. С. 740–745. DOI: 10.1016/j.ifacol.2015.09.057.
3. Aprea, C., Greco, A., & Maiorino, A. 2017. An application of the artificial neural network to optimize the energy performances of a magnetic refrigerator. *International Journal of Refrigeration*. Попередня онлайн публікація. DOI: 10.1016/j.ijrefrig.2017.06.015
4. Fadnes, F. S., Banihabib, R., & Assadi, M. 2023. Using Artificial Neural Networks to Gather Intelligence on a Fully Operational Heat Pump System in an Existing Building Cluster. *Energies*. 2023. Т. 16. № 5. С. 3875. DOI: 10.3390/en16093875.
5. Chae, S., Bae, S., & Nam, Y. 2023. Performance improvement of air-source heat pump via optimum control based on artificial neural network. *Energy Reports*. 2023. Т. 10. С. 460–472. DOI: 10.1016/j.egy.2023.06.051.
6. Lu, S., Li, Q., Bai, L., & Wang, R. 2019. Performance predictions of ground source heat pump system based on random forest and back propagation neural network models. *Energy Conversion and Management*. 2019. Т. 197. С. 111864. DOI: 10.1016/j.enconman.2019.111864.
7. Shin, J.-H.; Cho, Y.-H. Machine-Learning-Based Coefficient of Performance Prediction Model for Heat Pump Systems. *Applied Sciences*. 2022. Т. 12. С. 362. DOI: 10.3390/app12010362.
8. Волощук В. А., Шиндилюк П. В., Некрашевич О. В., Богза М. С., Гікало П. В. Дослідження динамічних характеристик теплонасосної установки типу «повітря-вода». *Вчені записки ТНУ імені В.І. Вернадського. Серія: Технічні науки*. 2023. Т. 34. № 73. С. 36–44. DOI: 10.32782/2663-5941/2023.3.2/07.
9. Волощук В. А., Шиндилюк П. В., Некрашевич О. В., Богза М. С., Гікало П. В. Дослідження динамічних характеристик теплонасосної установки типу «вода-вода». *Вчені записки ТНУ імені В.І. Вернадського. Серія: Технічні науки*. 2023. Т. 34. № 2. С. 36–44. DOI: 10.32782/2663-5941/2023.3.2/07.
10. Breiman L. Random Forests. *Machine Learning*. 2001. Vol. 45. No. 1. P. 5–32. DOI: 10.1023/A:1010933404324.
11. Pedregosa F., Varoquaux G., Gramfort A., Michel V., Thirion B., Grisel O., ... Duchesnay É. *Scikit-learn: Machine Learning in Python*. *Journal of Machine Learning Research*. 2011. Vol. 12. P. 2825–2830.
12. Rumelhart D. E., Hinton G. E., Williams R. J. Learning representations by back-propagating errors. *Nature*. 1986. Vol. 323. No. 6088. P. 533–536. DOI: 10.1038/323533a0.
13. Hochreiter S., Schmidhuber J. Long Short-Term Memory. *Neural Computation*. 1997. Vol. 9. No. 8. P. 1735–1780. DOI: 10.1162/neco.1997.9.8.1735.
14. Gers F. A., Schmidhuber J., Cummins F. Learning to Forget: Continual Prediction with LSTM. *Neural Computation*. 2000. Vol. 12. No. 10. P. 2451–2471. DOI: 10.1162/089976600300015015.
15. Cho K., Van Merriënboer B., Bahdanau D., Bengio Y. On the Properties of Neural Machine Translation: Encoder-Decoder Approaches. *arXiv preprint arXiv:1409.1259*. 2014.
16. Chung J., Gulcehre C., Cho K., Bengio Y. Empirical Evaluation of Gated Recurrent Neural Networks on Sequence Modeling. *arXiv preprint arXiv:1412.3555*. 2014.

17. Pedregosa F., Varoquaux G., Gramfort A., Michel V., Thirion B., Grisel O., ... Duchesnay É. Scikit-learn: Machine Learning in Python. *Journal of Machine Learning Research*. 2011. Vol. 12. P. 2825-2830.
18. Afram, A., & Janabi-Sharifi, F. (2014). Review of modeling methods for HVAC systems. *Applied Thermal Engineering*, 67*(1-2), 507-519. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2014.03.055>
19. Keras Documentation. Available online: <https://keras.io> (accessed on 26 December 2018).
20. Google. TensorFlow; Google LLC.: Mountain View, CA, USA, 2021
21. Géron A. Hands-On Machine Learning with Scikit-Learn, Keras, and TensorFlow. 2nd ed. O'Reilly Media, Inc.: Sebastopol, CA, USA, 2019.
22. Lenail, A.D.A. Neural Network SVG Visualizer [Computer Software]. 2015. Available online: <http://alexlenail.me/NN-SVG/index.html> (accessed on 27 June 2024).
23. Kingma D. P., Ba J. Adam: A Method for Stochastic Optimization. arXiv preprint arXiv:1412.6980. 2014.

Bogza M.S., Voloshchuk V.A. APPLICATION OF MACHINE LEARNING METHODS IN THE PROBLEMS OF MODELING THE DYNAMICS OF THERMAL POWER PLANTS

Modern trends in energy saving and energy efficiency are challenging researchers and engineers to improve technologies used in heating, ventilation and air conditioning systems. One of the key areas in this field is the optimization of heat pump units (HPUs), which provide high efficiency and energy savings. This article discusses modern approaches to modeling CHPs, including analytical and machine learning methods, to improve their efficiency and productivity.

Traditional analytical methods implemented in software packages such as MATLAB, COMSOL, or Python allow creating detailed models of thermal fluids based on physical principles. These models take into account various parameters and operating conditions of the system, which makes it possible to conduct a detailed analysis and predict its behavior. However, with the development of artificial intelligence technologies, in particular machine learning, it has become possible to use neural networks to model nonlinear systems such as TSUs. The article analyzes the use of machine learning models for modeling dynamic processes in TSUs, showing their effectiveness in predicting energy consumption and system performance.

The results of recent studies show that machine learning models can achieve high accuracy in predicting the parameters of CHP operation, such as thermal power, electricity consumption, coefficient of transformation (COP), and fault detection. The use of clean and synchronized data representing different operating conditions is an important aspect of the successful application of such models in the control algorithms of the CHP.

The purpose of this study is to develop and compare an analytical model of the heating and power plant based on MATLAB with machine learning models. In the course of the study, the advantages and disadvantages of each approach are identified, and recommendations for their use to optimize the operation of heat pumps are proposed. The developed computer models of the CHPs were tested on the basis of real experimental data, which ensured high modeling accuracy.

The conclusions of the study emphasize that the use of machine learning models, in particular ANN and Random Forest, can significantly reduce the calculation time and increase the flexibility of the system when processing various scenarios and operating conditions of CHP. This opens up new opportunities for optimizing the operation of heat pumps and improving their energy efficiency, which is an important aspect in the context of modern requirements for energy saving and environmental safety.

Key words: heat pump units (HPU), analytical models, machine learning, neural networks, random forests, forecasting, optimization.

Василенко В.М.

Державний університет «Житомирська політехніка»

Вакалюк Т.А.

Державний університет «Житомирська політехніка»

ШТУЧНИЙ ІНТЕЛЕКТ В УПРАВЛІННІ ПРОЄКТАМИ: АНАЛІЗ СУЧАСНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ ТА ПЕРСПЕКТИВ РОЗВИТКУ

У статті проведено комплексний аналіз трансформаційного впливу штучного інтелекту (ШІ) на сучасне управління проєктами (УП). Дослідження показує, як інструменти та методи на основі ШІ змінюють традиційні практики УП, відкриваючи нові можливості для оптимізації та інновацій.

Розглянуто ключові виклики, з якими стикаються менеджери проєктів у сучасному бізнес-середовищі, такі як необхідність підвищення ефективності управління, забезпечення високої точності та гнучкості у виконанні проєктних завдань. Показано, як ШІ може стати ефективним рішенням цих проблем, автоматизуючи рутинні завдання, надаючи аналітику на основі даних та сприяючи прийняттю обґрунтованих рішень. Це досягається завдяки здатності ШІ обробляти великі обсяги інформації, виявляти приховані закономірності та прогнозувати майбутні тенденції, що дозволяє менеджерам приймати більш виважені стратегічні рішення.

Детально проаналізовано переваги інтеграції ШІ в УП. Автоматизація рутинних операцій звільняє людські ресурси для вирішення складніших завдань, що вимагають креативності та експертизи. Аналітика на основі даних дозволяє виявляти вузькі місця та оптимізувати процеси, що призводить до скорочення витрат та підвищення продуктивності. ШІ також може допомогти у прогнозуванні ризиків та виявленні потенційних проблем на ранніх стадіях, що дозволяє вжити превентивних заходів та мінімізувати негативні наслідки.

Водночас, дослідження розглядає виклики та етичні аспекти впровадження ШІ, такі як конфіденційність даних, алгоритмічна упередженість та необхідність забезпечення прозорості та підзвітності рішень на основі ШІ. Впровадження ШІ вимагає ретельного планування та управління, а також постійного моніторингу та контролю.

У статті підкреслюється, що ШІ має потенціал революціонізувати управління проєктами, але його успішне впровадження вимагає комплексного підходу, що враховує як технічні, так і етичні аспекти. За умови відповідального та етичного використання, ШІ може стати потужним інструментом для досягнення цілей проєкту, підвищення ефективності та забезпечення успіху в умовах сучасного конкурентного бізнес-середовища.

Ключові слова: управління проєктами, штучний інтелект, автоматизація, ефективність, прийняття рішень, управління ризиками, розподіл ресурсів, інновації.

Постановка проблеми. Управління проєктами має велике значення для сучасної людини. Сучасний бізнес важко уявити без проєктів, великих і маленьких, комерційних і тих, що необхідні для покращення процесів всередині компаній. УП є важливим для будь-якої галузі, але для ІТ компаній, які працюють з проєктами щоденно, цей процес є життєво необхідним.

Штучний інтелект, концепція якого була сформульована ще в 1956 році, сьогодні переживає період бурхливого розвитку. Завдяки стрімкому технологічному прогресу, ШІ знаходить застосування в найрізноманітніших сферах – від персоналізованих рекомендацій в електронній комерції до автономних транспортних засобів.

З огляду на актуальність процесів УП та стрімкий розвиток ШІ, дослідження їх взаємодії набуває особливої ваги. ШІ активно інтегрується в УП, пропонуючи нові алгоритми, інструменти та програмне забезпечення.

Результати останнього опитування Capterra (2023) підтверджують позитивний вплив ШІ на УП: 93% керівників проєктів відзначили покращення результатів проєктів завдяки використанню ШІ-інструментів, водночас, лише 8% компаній не планують впроваджувати ШІ у свою операційну діяльність [13]. Завдяки новим генеративним можливостям ШІ, відкриваються перспективи оптимізації УП, зокрема стратегічного планування та досягнення проєктних цілей,

шляхом підвищення ефективності та якості прийняття рішень.

Вплив ШІ на організації в цілому є значним, і багато компаній вже активно інтегрують ці технології у свою операційну діяльність. Зважаючи на ключову роль УП в цих операціях, стає дедалі актуальніше досліджувати потенційне застосування алгоритмів і технологій ШІ в цій сфері. Щорічне глобальне опитування РМІ (2023) підтверджує практичне застосування ШІ в УП: 21% респондентів регулярно використовують ШІ для оптимізації операцій та прийняття рішень, а 82% керівників вищої ланки очікують значного впливу ШІ на стратегії УП [12]. Ці дані свідчать про зростаючу роль ШІ в УП та необхідність адаптації та постійного впровадження інновацій для фахівців у цій галузі. Наукова спільнота відіграє ключову роль у дослідженні та оцінці алгоритмічних та програмних інструментів ШІ, сприяючи їх ефективному застосуванню для досягнення кращих результатів проєктів.

Виникає питання вибору відповідних алгоритмічних і програмних інструментів для ефективного використання наявних технологій ШІ в системах УП. Хоча ШІ має величезний потенціал для революції в управлінні проєктами, фактичний процес впровадження може бути складним і потребує ретельного аналізу.

Ключові аспекти, які слід враховувати при виборі правильних алгоритмічних і програмних інструментів для інтеграції штучного інтелекту в системи управління проєктами включають:

- визначення конкретних проблем управління проєктами, які можна вирішити за допомогою штучного інтелекту;

- оцінку доступних алгоритмів і технологій штучного інтелекту для визначення їх придатності та сумісності із системами і процесами управління проєктами;

- забезпечення безперешкодної інтеграції обраних інструментів і алгоритмів з наявним програмним забезпеченням та інфраструктурою для керування проєктами.

- оцінка масштабованості та гнучкості інструментів на базі штучного інтелекту для адаптації до майбутнього зростання та нових потреб управління проєктами.

- врахування досвіду користувача та простоти впровадження для команд управління проєктами.

- вирішення проблем, пов'язаних із конфіденційністю даних, безпекою та етичним впровадженням ШІ.

Ретельний аналіз цих факторів та вибір відповідних алгоритмічних і програмних інструментів

дозволить організаціям використовувати потужність ШІ для покращення своїх можливостей УП, оптимізації розподілу ресурсів, підвищення якості прийняття рішень та, зрештою, досягнення більш успішних результатів проєктів.

Аналіз останніх досліджень і публікацій.

Дослідження алгоритмічного та програмного апарату для систем управління ІТ-проєктами з використанням технологій штучного інтелекту охоплює різні інноваційні підходи та методології, спрямовані на підвищення ефективності, прийняття рішень та прогнозування аналітики.

А. Бельхарет (A. Belharet) та інші досліджують потенціал штучного інтелекту для покращення управління проєктами в різних секторах, включаючи фінанси, охорону здоров'я та транспорт. Дослідження підкреслює, як ШІ може підвищити продуктивність і зменшити кількість помилок при розробці програмного забезпечення [11, с. 14].

Олатунде Фатай Бадмус (Olatunde Fatai Badmus) досліджує, як інтеграція технологій штучного інтелекту може покращити управління програмами, особливо при реалізації складних проєктів у динамічному корпоративному середовищі. Він стверджує, що ШІ може суттєво посилити такі ключові аспекти управління програмами, як прийняття рішень, розподіл ресурсів, оцінка ризиків та покращення загальних результатів проєкту [4, с. 50].

Застосування технологій штучного інтелекту, таких як машинне навчання, прогнозна аналітика, обробка природної мови та моделювання, надає менеджерам програм інструменти для ефективного аналізу та інтерпретації великих обсягів даних, що сприяє прийняттю більш обґрунтованих рішень [4, с. 49].

Хайтам Х. Ельмусаламі (Haytham H. Elmousalami) проводить ретельне порівняння 20 методів штучного інтелекту, що застосовуються в концептуальному моделюванні витрат для управління проєктами. Автор підкреслює важливість точного прогнозування витрат на ранніх етапах проєкту, особливо враховуючи високий рівень невизначеності та такі проблеми, як обмежені дані та відсутні значення. Дослідник використовує проєкти покращення польових каналів як тематичне дослідження для оцінки продуктивності моделей штучного інтелекту, прийшовши до висновку, що XGBoost виділяється як найточніший метод, заснований на середній абсолютній відсотковій похибці та скоригованих значеннях R-квадрат [8, с. 12].

Х. М. Меса Фернандес (J. M. Mesa Fernández) та інші досліджують вплив методів штучного

інтелекту на управління інноваційними проектами, що характеризуються високою мінливістю, невизначеністю, складністю та неоднозначністю. Автори вивчають застосування ШІ в таких аспектах управління технологічними інноваційними проектами, як управління ризиками, контроль витрат та дотримання термінів [6, с. 1].

Результати дослідження показують, що такі галузі, як будівництво, розробка програмного забезпечення та розробка продуктів, активно використовують ШІ в таких напрямках, як управління знаннями та системи підтримки прийняття рішень тощо. Дослідження пропонує комплексний погляд на роль ШІ в управлінні проектами, включаючи такі аспекти, як оцінка ризиків, оцінка витрат, розробка продукту та прогнозування тривалості проекту [6, с. 12].

Мунір Ель Катіб (Mounir El Khatib) та Ахмед Аль Фаласі (Ahmed Al Falasi) досліджують, як ШІ впливає на прийняття рішень в управлінні проектами. Дослідники виявили, що програми штучного інтелекту мають потенціал для покращення якості та цілісності даних, що, у свою чергу, може підвищити швидкість та ефективність прийняття рішень у проектних середовищах. Дослідники прийшли до висновку, що за правильного використання штучний інтелект може допомогти керівникам проектів приймати кращі рішення, надаючи якісніші дані, тим самим покращуючи загальне управління операціями [7, с. 258].

Валма Пріфті (Valma Prifti) досліджує застосування штучного інтелекту в управлінні проектами з метою оптимізації слабших сфер управління. У дослідженні було опитано керівників проектів про основні проблеми, з якими вони стикаються, і про те, як ШІ може стати інструментом для оптимізації. Результати показують, що управління ризиками, планування проектів, бюджетування та управління якістю є основними проблемами та потенційними сферами підтримки ШІ [10, с. 36].

Асма Альшейхі (Asma Alshaihi) та Машаль Хайят (Mashaal Khayyat) досліджують, як інтеграція ШІ в управління проектами може призвести до покращення аналізу даних, прийняття рішень, планування та складання графіків. Три основні проблеми, з якими стикається управління проектами, включають: обробку великих обсягів даних з обмеженими людськими ресурсами, необхідність планування на основі правил і створення підпроектів або мереж, які демонструють різні виробничі методи ШІ. Автори стверджують, що ШІ стає необхідним інструментом в УП, нада-

ючи розуміння можливих результатів, підтримку прийняття рішень та автоматизацію рутинних завдань, таких як відстеження прогресу [1, с. 4].

Постановка завдання. Метою статті є проаналізувати сучасний стан досліджень та перспективи розвитку щодо використання штучного інтелекту в управлінні проектами.

Виклад основного матеріалу. Поєднання методів ШІ, таких як машинне навчання, глибоке навчання та обробка природної мови, пропонує великий потенціал для вдосконалення систем управління проектами.

Керівники проектів відповідають за координацію планування, організацію та реалізацію проектів. Їх мета – забезпечити завершення проектів у визначені терміни та відповідно до заздалегідь визначених цілей. Вони також повинні ефективно управляти ресурсами та зменшувати ризики, не виходячи за рамки бюджету. Роль менеджера проекту є складною через широке коло обов'язків, які вимагають від нього співпраці з різними членами команди, клієнтами та зацікавленими сторонами. Керівники проектів повинні бути універсальними, адаптуючи свій підхід до конкретних вимог кожного проекту. Хоча штучний інтелект може посилити або розширити функції менеджерів проектів, їхнім основним обов'язком, як і раніше, залишатиметься використання їхнього досвіду для ініціювання та успішного завершення складних проектів.

ШІ можна використовувати кількома способами для спрощення та оптимізації процесів управління проектами. Наприклад, системи зі штучним інтелектом можуть аналізувати історичні дані проекту, щоб виявити закономірності та передбачити потенційні проблеми або затримки. Це дозволяє керівникам проектів проактивно вирішувати проблеми та приймати більш обґрунтовані рішення. Крім того, інструменти на основі штучного інтелекту можуть автоматизувати рутинні завдання, такі як розподіл ресурсів, планування завдань і відстеження прогресу, звільняючи керівників проектів для прийняття стратегічних рішень більш високого рівня.

Менеджери можуть використовувати штучний інтелект для підвищення ефективності роботи з багатьма базовими завданнями, які вимагають мінімальної участі людини. Це такі завдання, як виконання розрахунків, документування протоколів зустрічей, створення звітів, відстеження витрат, аналіз документів та перегляд оновлень прогресу проекту і задач [10, с. 36].

Інтеграція технологій штучного інтелекту в системи управління проектами має кілька пере-

ваг. По-перше, аналітика на основі ШІ може допомогти виявити закономірності, тенденції та аномалії в даних проєкту, що дає змогу керівникам проєктів ефективніше передбачати та мінімізувати потенційні ризики [10, с. 36; 1, с. 3].

Існує чимало прикладів, коли прогнозна аналітика може впливати на управління проєктами і навіть визначати результат проєкту. Прогнозний аналіз інтегрує машинне навчання, спостереження за поточними тенденціями та історичні закономірності, щоб визначити, як можуть бути виконані майбутні завдання або проєкти. Це дозволяє керівникам проєктів розпізнавати проблеми, що виникають, на ранніх стадіях і вживати активних заходів для їх вирішення до того, як вони призведуть до ескалації.

Штучний інтелект може допомогти знизити ризики та ефективніше управляти даними у масштабних проєктах, автоматизуючи збір та організацію даних. Аналізуючи структуровані та неструктуровані дані з різних джерел, ШІ може швидко виявляти тенденції, закономірності та потенційні проблеми, дозволяючи керівникам проєктів приймати більш обґрунтовані рішення та вчасно вживати коригувальні дії [10, с. 32].

Системи зі штучним інтелектом також можна використовувати для оптимізації розподілу ресурсів і планування задач, забезпечуючи ефективне та раціональне використання ресурсів проєкту. Це може сприяти підвищенню продуктивності, зниженню витрат і кращому дотриманню термінів виконання проєктів [10, с. 30; 1, с. 3].

Прогнозування найчастіше полягає у визначенні тривалості проєктів та аналізі бюджетних витрат, використовуючи такі методи, як регресійний аналіз, щоб допомогти у складних процесах прийняття рішень. Штучний інтелект має потенціал для покращення прогнозування, забезпечуючи простий доступ до великих масивів даних для більш точного та ефективного аналізу, а також враховує інформацію, отриману з різних джерел.

Бюджетні обмеження є одним з основних викликів в управлінні проєктами на сьогодні, оскільки від керівників проєктів постійно вимагається досягнення кращих результатів з використанням меншого обсягу ресурсів. Штучний інтелект може допомогти керівникам проєктів максимально ефективно використовувати кожен долар і забезпечити належний розподіл обмежених ресурсів для отримання максимального ефекту. Інструменти на основі штучного інтелекту можуть здійснювати оцінку витрат у режимі реального часу, відстежувати виконання бюджету

та будувати сценарії, що дає змогу керівникам проєктів ухвалювати зважені фінансові рішення, зменшувати перевитрати бюджету і, зрештою, реалізовувати проєкти більш економічно ефективно [10, с. 32].

Ретельний моніторинг та аналіз метрик проєкту має важливе значення для контролю за ходом виконання будь-якого проєкту. Використання штучного інтелекту для контролю виконання проєктів дає змогу отримати детальне уявлення про стан проєктів, виявити ті області, які можна удосконалити та оптимізувати. Аналітичні дошки та системи звітності зі штучним інтелектом можуть порівнювати та аналізувати дані з різних джерел, що дає змогу керівникам проєктів отримати комплексне розуміння стану проєкту та приймати рішення на основі отриманих даних.

Незважаючи на те, що інструменти для звітності та аналізу в режимі реального часу з'явилися зовсім нещодавно, очевидно, що вони дозволяють застосовувати більш раціональний і гнучкий підхід до управління проєктами. Завдяки рішенням зі штучного інтелекту, які здатні виявляти актуальні проблеми, керівники проєктів можуть оперативніше реагувати на них або використовувати отриману інформацію в майбутніх проєктах.

Прогнозна аналітика на основі ШІ також може допомогти менеджерам проєктів ефективніше прогнозувати та мінімізувати ризики. Аналізуючи історичні дані та актуальні показники проєкту, моделі штучного інтелекту можуть прогнозувати потенційні проблеми, такі як перевищення бюджету, затримки або проблеми з якістю, що дозволяє керівникам проєктів проактивно вирішувати ці проблеми.

Більше того, застосування штучного інтелекту може покращити комунікацію та співпрацю всередині проєктних команд. Чат-боти та віртуальні асистенти зі штучним інтелектом можуть допомогти впорядкувати обмін інформацією, координацію завдань і вирішення проблем, що призведе до покращення командної роботи та загальної ефективності проєкту.

Таким чином, інтеграція технологій штучного інтелекту в системи управління проєктами може значно покращити процес прийняття рішень, оптимізувати використання ресурсів, посилити співпрацю і, зрештою, підвищити ймовірність успішного завершення проєкту.

При впровадженні сучасних технологій штучного інтелекту в управління проєктами вкрай важливо оцінити проєктні роботи, враховуючи два ключових фактори: складність роботи і рівень залу-

чення людини до її виконання. Складність завдання може варіюватися від низької до високої залежно від різних елементів, таких як кількість задіяних змінних, врахування тонкощів бізнес-середовища та особливих навичок, необхідних для управління проектом. Рівень людського залучення безпосередньо пов'язаний зі складністю роботи; більш складні роботи вимагають посиленого людського контролю, щоб досягти бажаних результатів.

Дослідження показали, що оптимальне впровадження рішень для управління проектами на основі ШІ передбачає взаємодію між людьми та системами ШІ [10, с. 29]. Штучний інтелект може стати ключовим інструментом в управлінні проектами, пропонуючи різні рівні підтримки в управлінні проектами:

– *Автоматизація*: ШІ автоматизує повторювані завдання, підвищуючи ефективність та забезпечуючи узгодженість.

– *Допомога*: ШІ надає попередній аналіз та пропозиції, допомагаючи менеджерам приймати обґрунтовані рішення.

– *Доповнення*: ШІ розширює можливості менеджерів, надаючи інструменти для вирішення складних проблем та прийняття стратегічних рішень.

Такий підхід дозволяє ефективно використовувати ШІ в різних сценаріях управління проектами, адаптуючись до вимог кожного завдання та забезпечуючи оптимальний баланс між автоматизацією та людським внеском.

Таблиця 1 ілюструє, як ШІ може бути інтегрований у різні аспекти управління проектами, враховуючи складність завдань та необхідний рівень участі людини. Дослідження показують, що оптимальне використання ШІ в управлінні проектами передбачає співпрацю між людьми та ШІ-системами, де ШІ бере на себе рутинні та обчислювальні завдання, а люди зосереджуються на стратегічних рішеннях та складних проблемах [1, с. 2; 9, с. 3075].

Впровадження штучного інтелекту в управління проектами приносить кількісно вимірювані переваги у кількох ключових аспектах. Ефективність є ключовою перевагою, оскільки ШІ може впорядкувати робочі процеси проектів, автоматизуючи такі завдання, як введення даних, планування та створення звітів. Така автоматизація значно скорочує час, необхідний для виконання цих завдань, з годин до хвилин, тим самим прискорюючи терміни реалізації проектів і дозволяючи командам швидше досягати поставлених цілей. Крім того, ШІ допомагає знизити витрати за рахунок автоматизації та оптимізації проектних завдань, що призводить до мінімізації накладних витрат. Наприклад, ШІ може оптимізувати розподіл ресурсів, зменшуючи їх недовикористання та надлишок, що, своєю чергою, зменшує фінансове навантаження, спричинене неефективним управлінням ресурсами.

Однією з важливих переваг впровадження штучного інтелекту в управління проектами є підвищення точності. Інструменти штучного інтелекту оснащені розширеними аналітичними можливостями, які можуть обробляти великі масиви даних з високою точністю, що призводить до більш точного прогнозування, оцінки ризиків і прийняття рішень. Така підвищена точність зменшує похибку, яка може виникнути через людський фактор, тим самим покращуючи загальну якість результатів проекту. Крім того, ШІ дає можливість менеджерам проектів зосередитися на творчих і стратегічних завданнях вищого рівня, вирішуючи монотонні або складні завдання, що базуються на даних. Це дозволяє менеджерам займатися діяльністю, що вимагає людської інтуїції, наприклад, переговорами із зацікавленими сторонами, стратегічним плануванням та управлінням інноваціями, тим самим збільшуючи їхній внесок у досягнення організаційних цілей.

Інтеграція штучного інтелекту в управління проектами отримує все більше визнання через

Таблиця 1

Рівні підтримки ШІ в управлінні проектами

| Рівень підтримки | Складність завдання | Ступінь залучення людини | Приклади |
|------------------|---------------------|--------------------------|---|
| Автоматизація | Низька | Мінімальний | Створення стандартних звітів, аналіз даних, узагальнення протоколів зустрічей, рутинні розрахунки |
| Допомога | Помірна | Помірний | Попередній аналіз даних, розробка календарних планів, оцінка ризиків |
| Доповнення | Висока | Значний | Створення бізнес-кейсів, складні процеси прийняття рішень, управління взаємозалежними завданнями |

свій потенціал революційно змінити практику управління проектами. Технології ШІ швидко розвиваються і, як очікується, вплинуть на сферу управління проектами на багатьох рівнях [14, с. 61]. Однак залишається високий рівень невизначеності щодо конкретного впливу, який ШІ може мати на практику управління проектами [2, с. 8]. Вбудовуючи практики управління проектами зі штучним інтелектом у більш широкий організаційний контекст, можна краще зрозуміти наслідки дослідження управління проектами в контексті штучного інтелекту. Такий цілісний підхід може визначити більш широкі організаційні зміни, необхідні для повного використання переваг ШІ в управлінні проектами.

Роль штучного інтелекту в управлінні проектами виходить за рамки простого спрощення робочих процесів; він також відіграє вирішальну роль у процесах прийняття рішень. Інформаційні системи управління проектами, що підтримуються штучним інтелектом, надають менеджерам і зацікавленим сторонам детальну інформацію для покращення планування, моніторингу та контролю бізнесу [3, с. 3]. Така інтеграція ШІ в процеси прийняття рішень підвищує загальну ефективність і результативність практик управління проектами. Крім того, інструменти управління проектами на основі штучного інтелекту можуть проактивно виявляти та зменшувати ризики, що призводить до більш успішних результатів проектів.

Потенційні переваги інтеграції генеративного штучного інтелекту в гнучкі методології були досліджені для оптимізації робочих процесів розробки та усунення загальних проблем управління проектами. Цей підхід має на меті сприяти інноваціям та вдосконаленню практики управління проектами в рамках Agile-методологій. Крім того, вплив ШІ на управління ризиками в інженерних проектах підкреслює важливість розробки фреймворків для управління ризиками, пов'язаними з інтелектуальним прийняттям рішень [5, с. 55]. Ці фреймворки надають рекомендації щодо впровадження необхідних бізнес-процесів для ефективного зниження ризиків.

Хоча переваги штучного інтелекту є переконливими, для повного використання його потенціалу необхідно вирішити низку проблем і врахувати етичні міркування. Питання конфіденційності даних виникають через те, що системи ШІ потребують доступу до величезних обсягів даних для навчання і прогнозування, що створює невід'ємні ризики, пов'язані з конфіденційністю та безпекою даних. Забезпечення відповідності глобальним

нормам захисту даних (наприклад, GDPR, HIPAA) має вирішальне значення. Крім того, ефективність системи штучного інтелекту значною мірою залежить від якості та кількості навчальних даних, які вона отримує, що вимагає різноманітних, всебічних і неупереджених навчальних наборів, збір яких часто є складним і ресурсоемним завданням. Інтеграція інструментів штучного інтелекту в існуючі робочі процеси також може бути складною і вимагати коригування командної динаміки і робочих процесів; тому для успішного впровадження важливо забезпечити наявність зручних інструментів і належним чином підготовленого персоналу для взаємодії.

Ще однією проблемою є упередженість і непрозорість, притаманні алгоритмам ШІ, які можуть призвести до несправедливого або упередженого прийняття рішень, що ставить під загрозу доброчесність управління проектами. Щоб вирішити ці проблеми, організації повинні розробити надійну систему управління, яка забезпечить прозорість, підзвітність та етичність практик ШІ.

Незважаючи на ці виклики, потенційні переваги штучного інтелекту в управлінні проектами є значними, і організації все частіше вивчають способи використання його потенціалу.

Висновки. Інтеграція штучного інтелекту в управління проектами має значний потенціал для трансформації цієї сфери, пропонуючи значні переваги в ефективності, скороченні витрат, підвищенні точності та покращенні процесів прийняття рішень. Автоматизація рутинних завдань, оптимізація розподілу ресурсів та розширені аналітичні можливості дозволяють керівникам проектів зосередитися на стратегічних цілях, підвищуючи їх внесок у досягнення загальних результатів організації.

Дослідження підкреслюють потенціал генеративного ШІ для оптимізації робочих процесів та вирішення типових проблем УП, особливо в межах гнучких методологій (Agile). Це відкриває нові можливості для інновацій та вдосконалення практик УП. Крім того, ШІ відіграє важливу роль в управлінні ризиками інженерних проектів, що вимагає розробки спеціалізованих фреймворків для ефективного зниження ризиків, пов'язаних з інтелектуальним прийняттям рішень.

Незважаючи на виклики та етичні питання, пов'язані з використанням ШІ в УП, його потенційні переваги є незаперечними. Організації все частіше досліджують можливості ШІ, прагнучи підвищити ефективність та конкурентоспроможність. З розвитком технологій ШІ його роль в УП буде лише зростати, стимулюючи подальші інно-

вації та оптимізацію процесів. Проактивний підхід до впровадження ШІ, з урахуванням потенційних проблем та етичних аспектів, дозволить організаціям досягти успіху в умовах постійно мінливого бізнес-середовища.

Перспективи подальших досліджень у сфері управління проектами пов'язані з вивченням ступеня впливу штучного інтелекту на різні аспекти цієї діяльності, зокрема планування, аналізу проєктів, управління ризиками та ресурсами. Особливу

увагу слід приділити детальному аналізу алгоритмів та методів ШІ, що застосовуються у цих аспектах. Не менш важливим є дослідження стратегій впровадження та організаційних змін, необхідних для успішної інтеграції ШІ у практику управління проектами. Важливим напрямом досліджень є також вивчення етичних аспектів використання ШІ у цій сфері та розробка відповідних систем управління, які б забезпечували відповідальне та прозоре застосування штучного інтелекту.

Список літератури:

1. A. Alshaikhi, M. Khayat. An investigation into the impact of artificial intelligence on the future of project management. *2021 international conference of women in data science at taif university (widstaif)*. 2021. P. 1–4. URL: <https://doi.org/10.1109/WiDSTaif52235.2021.9430234>
2. A review of the current and future developments of artificial intelligence in the management and building sectors / A. Mishra et al. *Multidisciplinary reviews*. 2024. Vol. 6. P. 2023ss068. URL: <https://doi.org/10.31893/multirev.2023ss068>
3. Artificial intelligence enabled project management: a systematic literature review / I. Taboada et al. *Applied sciences*. 2023. Vol. 13, no. 8. P. 5014. URL: <https://doi.org/10.3390/app13085014>
4. Badmus O. F. Application of AI technology in program management. *Journal of engineering research and reports*. 2023. Vol. 25, no. 8. P. 48–55. URL: <https://doi.org/10.9734/jerr/2023/v25i8958>
5. Bahi A., Gharib J., Gahi Y. Integrating generative AI for advancing agile software development and mitigating project management challenges. *International journal of advanced computer science and applications*. 2024. Vol. 15, no. 3. URL: <https://doi.org/10.14569/ijacsa.2024.0150306>
6. Bibliometric analysis of the application of artificial intelligence techniques to the management of innovation projects / J. M. Mesa Fernández et al. *Applied sciences*. 2022. Vol. 12, no. 22. P. 11743. URL: <https://doi.org/10.3390/app122211743>
7. El Khatib M., Al Falasi A. Effects of artificial intelligence on decision making in project management. *American journal of industrial and business management*. 2021. Vol. 11, no. 03. P. 251–260. URL: <https://doi.org/10.4236/ajibm.2021.113016>
8. Elmousalami H. H. Comparison of artificial intelligence techniques for project conceptual cost prediction: a case study and comparative analysis. *IEEE transactions on engineering management*. 2021. Vol. 68, no. 1. P. 183–196. URL: <https://doi.org/10.1109/tem.2020.2972078>
9. Modelling hybrid human-artificial intelligence cooperation: a call center customer service case study / L. Kahn et al. 2020. 3075 p. URL: <https://doi.org/10.1109/BigData50022.2020.9377747>
10. Prifti V. Optimizing project management using artificial intelligence. *European journal of formal sciences and engineering*. 2022. Vol. 5, no. 1. P. 29. URL: <https://doi.org/10.26417/667hri67>
11. Report on the impact of artificial intelligence on project management / A. Belharet et al. *SSRN electronic journal*. 2020. URL: <https://doi.org/10.2139/ssrn.3660689>
12. Shaping the future of project management with AI. *PMI: Project Management Institute*. URL: <https://www.pmi.org/learning/thought-leadership/ai-impact/shaping-the-future-of-project-management-with-ai>
13. Taylor P. The state of AI in PM: leading project manager unpacks brand new capterra data. *Capterra*. URL: <https://www.capterra.com/resources/data-on-ai-in-project-management/>
14. Wachnik B. Analysis of the use of artificial intelligence in the management of Industry 4.0 projects. The perspective of Polish industry. *Production engineering archives*. 2022. Vol. 28, no. 1. P. 56–63. URL: <https://doi.org/10.30657/pea.2022.28.07>

Vasylenko V.M., Vakaliuk T.A. ARTIFICIAL INTELLIGENCE IN PROJECT MANAGEMENT: ANALYSIS OF MODERN RESEARCH AND DEVELOPMENT PROSPECTS

The article provides a comprehensive analysis of the transformational impact of artificial intelligence (AI) on modern project management (PM). The study shows how AI-based tools and methods are changing traditional practices of the PM, opening up new opportunities for optimisation and innovation.

The key challenges faced by project managers in today's business environment, such as the need to improve management efficiency, ensure high accuracy and flexibility in project tasks, are considered. The paper shows how AI can be an effective solution to these problems by automating routine tasks, providing data-driven

analytics, and facilitating informed decision-making. This is achieved through the ability of AI to process large amounts of information, identify hidden patterns and predict future trends, allowing managers to make more informed strategic decisions.

The benefits of integrating AI into the management system are analysed in detail. Automation of routine operations frees up human resources to solve more complex tasks requiring creativity and expertise. Data-driven analytics can identify bottlenecks and optimise processes, leading to cost savings and increased productivity. AI can also help to predict risks and identify potential problems at an early stage, allowing preventive measures to be taken and negative consequences to be minimised.

At the same time, the study examines the challenges and ethical aspects of AI implementation, such as data privacy, algorithmic bias, and the need to ensure transparency and accountability of AI-based solutions. AI implementation requires careful planning and management, as well as constant monitoring and control.

The article emphasises that AI has the potential to revolutionise project management, but its successful implementation requires a comprehensive approach that takes into account both technical and ethical aspects. If used responsibly and ethically, AI can be a powerful tool for achieving project goals, increasing efficiency, and ensuring success in today's competitive business environment.

Key words: *project management, artificial intelligence, automation, efficiency, decision-making, risk management, resource allocation, innovation.*

Вдовичин Т.Я.

Дрогобицький державний педагогічний університет імені Івана Франка

Білий Р.Т.

Дрогобицький державний педагогічний університет імені Івана Франка

ЦИФРОВИЙ ІНСТРУМЕНТ GOOGLE SITES ДЛЯ СТВОРЕННЯ Е-ПОРТФОЛІО

Розвиток сучасного суспільства диктує нові вимоги до потенційних працівників щодо пошуку місця праці. Першочерговим завданням для фахівців є формування автобіографії, де будуть міститися дані про власні досягнення та результати професійної діяльності. Проте, застосування цифрових інструментів для реалізації цієї мети теж знайшло свій відбиток, зокрема, реалізації «досьє» про себе у формі електронного портфоліо (е-портфоліо), популярність якого постійно зростає. Е-портфоліо у цифровому форматі зберігає дані чи документи, що засвідчують досягнення конкретної особи, відображають професійний досвід та всебічний розвиток. На протизвагу написанню автобіографії, е-портфоліо дає можливість акумулювати свої досягнення у сучасному форматі та вдихнути цікаві ідеї для демонстрації етапності розвитку професійної майстерності. З іншої сторони, е-портфоліо дозволяє мотивувати фахівця до постійного саморозвитку та самоосвіти, вдосконалення та самоаналізу. Оглянувшись на попередній досвід за матеріалами е-портфоліо, є можливість здійснити повноцінний аналіз стану реалізації професійних завдань, які ставляться перед даним працівником.

У статті проаналізовано поняття «е-портфоліо» та його класифікації, переваги та недоліки різних його видів, мету створення та функції. Розкрито призначення е-портфоліо для працівника та описано вимоги до оформлення. Наголошено на ролі е-портфоліо як інструменту для самооцінювання та самовдосконалення, систематичності роботи, об'єктивності, достовірності поданих відомостей та їх логічності викладу, постійного моніторингу професійної діяльності та особистої відповідальності фахівця.

У статті продемонстровано алгоритм створення е-портфоліо для працівника, здійснивши вибір серед цифрових інструментів на прикладі сервісу Google Sites, що дозволяє використовувати його функціонал для цієї мети. Google Sites більше призначений для створення сайтів, але у своїй галереї шаблонів містить елемент Портфоліо, який можна використовувати для таких цілей. Сам додаток Портфоліо містить простий і зрозумілий інтерфейс, тобто працівнику не потрібно перейматися технічними аспектами обраного цифрового інструменту, достатньо лише структурувати потрібну інформацію, чітко продумати вміст портфоліо та використовувати шаблони для його наповнення.

Ключові слова: е-портфоліо, цифровий інструмент, Google Sites.

Постановка проблеми. «Портфоліо» в українському словнику є словом іншомовного походження та в перекладі з англійської мови означає «папка, портфель», з італійської – «папка з документами», з французької – «збірка досягнень». Саме поняття портфоліо прийшло з західної Європи, коли приблизно в 15–16 столітті архітектори представляли ескізи своїх будівельних проєктів, а вміст таких папок давав замовнику уявлення про професійні здібності майстра. Протягом певного часу у зміст поняття «портфоліо» втілювали збір робіт як дизайнерів чи фотографів, так і архітекторів, фінансистів чи фахівців щодо роботи з клієнтами. Також портфоліо активно застосовують як для демонстрації досягнень організацій в цілому, так і для окремих працівників.

«Електронне портфоліо фахівця (е-портфоліо) – це «пакет документів», за допомогою яких власник систематизує досягнення, надає зразки виконаних робіт, отримані свідоцтва і сертифікати, а також досвід в опануванні певними компетентностями» [1]. Н.В. Житеньова вважає, що «е-портфоліо є елементом самопрезентації майбутнього фахівця, що дає змогу роботодавцям об'єктивно оцінити його компетентності» [2]. На думку С.С. Шевчук, поняття е-портфоліо можна ототожнити з «вебпортфоліо, як системи е-портфоліо, що є динамічними та налаштованими через вебсайт» [5]. З іншої сторони, е-портфоліо – це «розроблена з використанням цифрових технологій, структурована сукупність досягнень, що окреслює компетентності, професійний досвід і всебічний розвиток. У такій формі відображає

ються, накопичуються, оцінюються і поновлюються результати професійної діяльності та суспільної активності індивіда» [6].

Перевагами е-портфоліо науковці відмічають динамічність та відкритість інформації про конкретну особистість, що є досить зручно. Також у різних публікаціях описана різна класифікація портфоліо (рис. 1), що може відрізняються за структурою, наповненням та ціллю, з якими створюється.

| Класифікація портфоліо | | |
|---|---|--|
| Характеристика: | Переваги: | Недоліки: |
| <i>загальне</i> – взаємооцінювання, розміщення відгуків, рекомендаційних листів, резюме; | різностороннє відображення всебічного розвитку; | об'ємність матеріалів, складність їх узагальнення й опрацювання; |
| <i>демонстраційне</i> – самооцінка, розміщення визначених власником робіт та інших даних; | узагальненість і систематизація матеріалів; | суб'єктивне розуміння ситуації відсутність щоденних результатів пізнання та інших видів праці; |

Рис. 1. Класифікація портфоліо

Щодо мети створення, то е-портфоліо може бути прикладом самооцінки, аналізом досягнень, звітом за результатами діяльності. За змістом, воно може бути тематичне, рефлексивне, проблемно-орієнтоване, інформаційне. Деякі науковці розглядають статичне (наприклад, у вигляді візитівки) і динамічне (наприклад, блог, сайт) е-портфоліо, кожне з яких відображає особисті й професійні досягнення власника [4].

Аналізуючи вище наведене, подання портфоліо може бути в різній формі, залежно від мети створення, структури та особливостями професійної діяльності власника.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Заслуговує увагу на аналіз можливостей щодо створення та наповнення е-портфоліо у дослідженнях іноземних науковців, а саме: S.R. Hanum, A.I. Che-Ani, S. Johar, K. Ismail, M.Z. Abd Razak [7], B. Hiller, J. Pauschenwein, H. Sandtner, A. Sfiri, B. Porotschnig, G. Ritter, H. Mgarbi, M.Y. Chkouri, A. Tahiri [8], N. Strudler, K. Wetzal [9].

Дослідженням основних компонентів та структури е-портфоліо як інструменту самопрезентації майбутнього фахівця займалися Н.В. Морзе, Л.О. Варченко-Троценко, С.С. Шевчук [5], В.Ю. Биков, С.Г. Литвинова, С.М. Тукало, Т.А. Вакалюк, С.М. Іванова, А.В. Кільченко, О.О. Долженков, Т.Г. Постоян [6], А.А. Кендюхова, Н.В. Житеньова [2], Н.В. Никоненко тощо. Важлива частка цих наукових публікацій присвячена використанню е-портфоліо як засобу відображення професійної підготовки педагогічних працівників освітньої галузі.

Постановка завдання. Реалізація цифрового інструменту Google Sites для створення е-портфоліо працівника.

Виклад основного матеріалу дослідження. Систематичний аналіз діяльності працівника у вигляді е-портфоліо демонструє всесторонній розвиток. Вкладена інформація у е-портфоліо дає можливість знайти відповіді на різні питання, щоб власне оцінити себе критично та одночасно мотивувати до руху вперед, що сприяє професійному зростанню. Етапи створення та наповнення е-портфоліо характеризуються взаємодоповненням та взаємопроникненням, про що свідчать результати різних аспектів щодо систематизації мети, змісту та його видів. Щоб спроектувати е-портфоліо, потрібно структурувати відомості по розділах. Проте, в будь-якому випадку, процес налаштування е-портфоліо – це творча активність працівника, його бачення та відображення результатів своєї праці.

Складання е-портфоліо включає кілька етапів: формулювання змісту, аналізу оцінки досягнень; систематичність щодо оновлення даних, відстеження результатів діяльності тощо. Основні правила щодо складання е-портфоліо та вимоги до нього представлено на рис. 2 та 3.

Основні правила складання електронного портфоліо:

- ✓ якомога точніше сформулювати портфоліо, самокритично оцінивши свої можливості і здібності;
- ✓ визначити вигляд і структуру портфоліо, види рефлексії і критерії оцінки;
- ✓ зібрати наявні документи і матеріали і розташувати їх в певному порядку; скласти перелік;
- ✓ важливо періодично поповнювати портфоліо відповідними документами і відстежувати результати роботи відповідно до поставлених цілей;
- ✓ вказати джерела використаної для роботи інформації, описувати засоби і методи роботи.

Рис. 2. Правила складання е-портфоліо

Основні вимоги до оформлення портфоліо:

- 1) системність і регулятивність самомоніторингу;
- 2) достовірність;
- 3) об'єктивність;
- 4) націленість автора на самовдосконалення;
- 5) структурування матеріалів, логічність і лаконічність всіх письмових пояснень;
- 6) акуратність і естетичність оформлення;
- 7) цілісність, тематична завершеність представлених матеріалів;
- 8) наочність результатів роботи;
- 9) технологічність.

Рис. 3. Вимоги до складання електронного портфоліо

Процес планування роботи над е-портфоліо плавно переходить в проектування та наповнення. Важким є і вибір потрібного цифрового інструменту, у якому можна було б реалізувати

е-портфолію. З однієї сторони – працівник може обрати для себе вже знайомий інструмент і вдосконалювати роботу з ним ще глибше, а з іншої сторони – вибір незнайомого інструменту розпочинає ще додатково процес адаптації, окрім підготовки та структурування самого е-портфолію. Хоча результат в будь-якому випадку буде однаковий, адже разом із процесом створення та наповнення е-портфолію, працівник зможе підвищити власну цифрову обізнаність в цьому питанні та професійну компетентність. Цифрові інструменти, що можуть бути корисними для створення е-портфолію, об'єднують використання хмарних технологій. Це дозволяє не лише в потрібний час презентувати власні досягнення, але користуватися перевагами швидкого та оперативного доступу до інформації як з різних пристроїв, так і в будь-якому географічно віддаленому місці. Іншими додатковими характеристиками цифрових інструментів для роботи з е-портфолію є багатоплатформність, функціональність, зручність, доступність, захищеність власних даних тощо. Також працівнику важлива можливість оперативно інтегрувати дані з інших застосунків, власних аккаунтів, соціальних мереж тощо.

Створити е-портфолію можна з використанням Google Sites. Обліковий запис та доступ до сервісів Google для звичайного користувача є інтуїтивно зрозумілим, оскільки за різними статистичними підрахунками, дана компанія користується популярністю серед будь-якого споживача інформаційних послуг. Якщо для пересічного користувача пошуковий та поштовий сервіс, перекладач чи карти від Google є давно знайомими, то використання додатку Google Sites потребує більших зусиль та адаптації, хоча є досить простим та зрозумілим через використання шаблонів та можливості інтегрування зображень, відео та посилань на потрібні ресурси. Даний сервіс не містить реклами, що дозволяє користувачеві зосередитись на створенні власних проєктів.

Google Sites містить достатньо велику галерею шаблонів, серед яких є Портфолію (рис. 4), що дозволяє використовувати всі потрібні функції для його створення та наповнення. Важлива перевага – це можливість доступу до власних ресурсів користувача, в тому числі е-портфолію, з різних технічних пристроїв в межах одного облікового запису, а зручним – відображення на сучасних смартфонах.

Сам шаблон Портфолію (рис. 5) має простий і зрозумілий інтерфейс, тобто не потрібно перейматися технічними аспектами обраного цифро-

вого інструменту, достатньо лише структурувати потрібну інформацію, чітко продумати вміст е-портфолію та використовувати можливості для його наповнення.

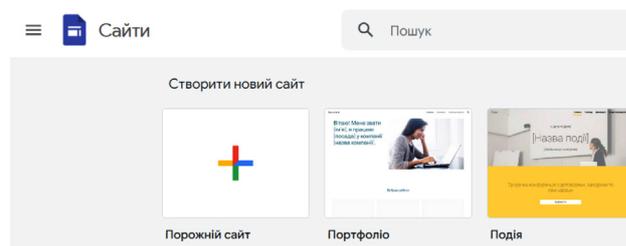


Рис. 4. Сервіс Google Sites

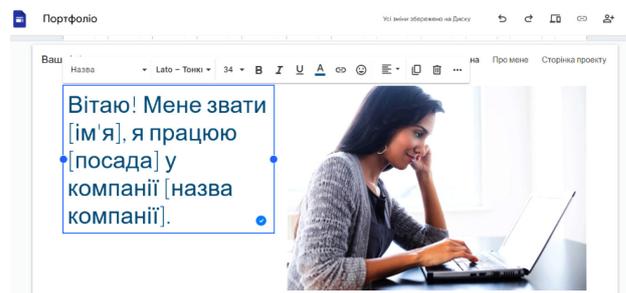


Рис. 5. Вікно «Портфолію»

Сервіси Google мають корисну функцію синхронізації. Вона дозволяє синхронізувати дані на різних девайсах, а також сприяє поєднанню сервісів між собою. Цю функцію можна спостерігати і при створенні портфолію. По-перше, коли лише відкривається вікно «Портфолію», то вгорі можна побачити повідомлення «Усі зміни збережено на Диску». По-друге, перейшовши на Диск, теж можна побачити, що автоматично на ньому створено файл з назвою Портфолію. Якщо користувач буде вносити зміни в своє портфолію, то вони будуть динамічно відображатись та оновлюватись на Диску.

Перед тим, як вносити інформацію у шаблон е-портфолію, варто спочатку структурувати дану інформацію. Це можна зробити з використанням меню, яке знаходиться в правому верхньому куті вікна та містить елементи: Вставити, Сторінки, Теми (рис. 6).

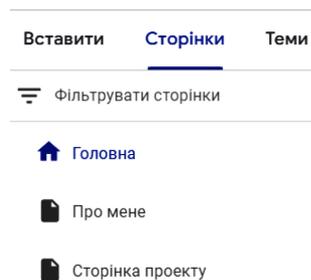


Рис. 6. Меню вікна Портфолію

Сторінки можна налаштовувати під потреби користувача, а саме зробити домашньою сторінкою, копіювати чи видалити, додати підсторінку, вилучити з панелі навігації та переглянути властивості. Створені сторінки можна також фільтрувати. Всі елементи шаблону можна переміщувати в потрібне місце, змінювати стилістично, копіювати чи видалити. Стиль оформлення розділів теж можна обрати з запропонованого списку, або використати зображення з конкретного пристрою, або готовий з галереї, чи з Google Фотографії, Зображень або Діску, або віднайти за URL-адресою. Якщо до конкретного розділу потрібно додати зображення чи відео, то є теж різні варіанти, зокрема, додати з пристрою, вибрати з облікового запису, з Діску, з YouTube, Календаря чи Карти. Додати до розділів можна не лише зображення, використовуючи пункт Вставка, можна долучати й інші об'єкти (рис. 7).

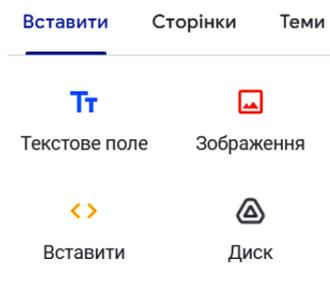


Рис. 7. Вставка різних елементів

Блоки контенту, що буде розміщуватися в е-портфоліо, теж можна налаштовувати за вподобанням користувача та долучати будь-який об'єкт, за потребою (рис. 8).

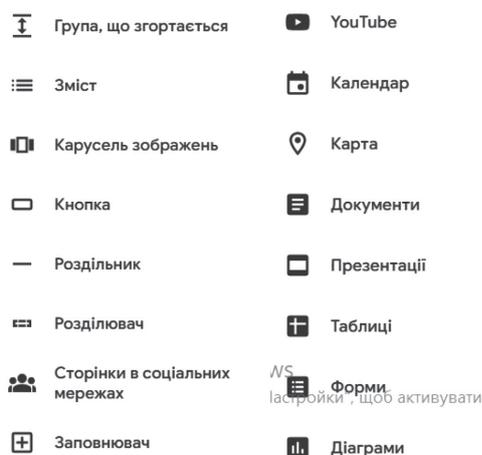


Рис. 8. Блоки контенту

Зокрема, якщо використовувати об'єкт «Група, що розгортається», то можна редагувати осно-

вний текст з використанням відомих інструментів, а також допоміжного тексту, в результаті отримати ефект, коли до цікавого заголовку додається ще детальніша інформація. Використання об'єкту «Карусель зображень» дозволяє додати більшу кількість зображень та в е-портфоліо відображати їх, змінюючи один одного. Елемент «Кнопка» дає можливість створити в е-портфоліо посилання на певний ресурс, а поділити блоки контенту можна з використанням «Роздільника» та «Розділювача». Посилання на соціальні мережі деталізують профіль е-портфоліо та долучають ще додаткову інформацію з них, а використання «Заповнювача» дозволяє поставити в потрібному місці ще й інші різні ресурси та об'єкти. Ставлячи в е-портфоліо мітки на місця, що важливі для власника, визначаючи конкретно їх географічну локацію, можна з використанням інструменту «Карти». Файли офісного пакету з Діску, зокрема, Документи, Таблиці та Презентації, можна активно додавати у е-портфоліо, а Форма дозволяє проводити як опитування, так і діагностувати певні результати. Стилістичне оформлення е-портфоліо можна налаштувати у меню «Теми».

Головна сторінка портфоліо потребує ретельної підготовки та особливого дизайнерського підходу. Вверху головної сторінки можна ввести назву самого файлу, а також додати як ім'я власника е-портфоліо, так і логотип. Крім цього, у заголовку є можливість долучати верхній колонтитул різними способами, а введення заголовків чи певного тексту відкриває звичні інструменти для редагування та розміщення тексту (рис. 9).



Рис. 9. Інструменти редагування тексту

У правому верхньому куті е-портфоліо відображається просте меню, що дозволяє скасувати останню дію, здійснити попередній перегляд, скопіювати посилання на вже опублікований сайт, додати інших користувачів та відкрити інші додаткові параметри налаштування е-портфоліо щодо перегляду історії версій, дублювання файлу та детального аналізу політики конфіденційності.

Після внесення всієї потрібної інформації, редагування текстів та додавання різноманітних об'єктів, можна переходити до етапу публікування е-портфоліо. Тут слід внести назву власного файлу, а система генерує різні можливості і дає

підказки, чи дійсно створена адреса для опублікування в інтернеті даного е-портфоліо є унікальна. Також надаються параметри, хто і яким чином може переглядати даний проєкт. Після внесення всіх правок, користувач отримує повідомлення, що «Ваш сайт опубліковано» (рис. 10).

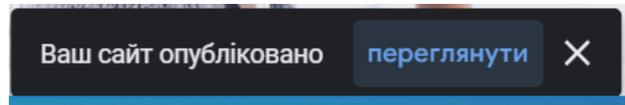


Рис. 10. Повідомлення про публікування портфоліо

Тому, щоб в оновленій формі подати працівнику власні професійні здобутки, можна скористатись таким інноваційним інструментом як створення та наповнення власного портфоліо. Е-портфоліо може відігравати різні ролі, зокрема, зміст його розглядається у таких трьох основних напрямках: зміст портфоліо як результат власної професійної діяльності; портфоліо як інструмент для самоаналізу та самоконтролю діяльності; портфоліо як засіб для розуміння динаміки розвитку професійних компетентностей.

Висновки. Призначення портфоліо для особистості дозволяє систематизувати досвід не лише для того, щоб критично глянути на власну професійну діяльність, а й об'єктивно оцінити рівень набутих

компетентностей. Завданнями е-портфоліо є не лише систематизація й узагальнення своїх напрацювань, а й моніторинг професійної діяльності, подання власних досягнень в іншій формі.

Важливою характеристикою е-портфоліо є можливість розміщення інформації у відкритому доступі, що демонструє результати роботи працівника. Оскільки доступ інформації з е-портфоліо забезпечується з використанням цифрових інструментів, то власне наявність такого портфоліо демонструє рівень сформованості працівника його цифрової компетентності. Вміст самого портфоліо – це індивідуальне бачення кожного користувача, але наповнення та супровід показує рівень самооцінки, моніторингу власної діяльності, зростання та підвищення кваліфікації. Професійні компетентності сучасного фахівця базуються на здатності використовувати цифрові інструменти у різних сферах суспільного життя, а е-портфоліо – є засобом діагностики власного цифрового розвитку та орієнтиром для вдосконалення та вироблення професійної майстерності. Е-портфоліо дозволяє не тільки зібрати весь спектр документів, фактів, подій, заходів, що засвідчують професійну діяльність, а й обізнаність у різноманітті цифрових засобів, інструментів, сервісів, які активно застосовуються у суспільному житті.

Список літератури:

1. Никоненко Н.В. Професійне портфоліо вчителя спеціальної освіти: призначення та структурні компоненти. Науковий часопис НПУ ім. М.П. Драгоманова. Серія: Педагогічні науки: реалії та перспективи. 2021. № 79(2). 13–18.
2. Житеньова Н.В. Електронне портфоліо як інструмент самопрезентації майбутнього фахівця. Відкрите освітнє е-середовище сучасного університету. 2017. № 3. 212–219.
3. Вакалюк Т.А., Іванова С.М., Кільченко А.В. Електронне портфоліо як засіб відображення результатів науково-педагогічної діяльності викладачів ЗВО. Науковий вісник Ужгородського університету. Серія: Педагогіка. Соціальна робота. 2021. № 1(48). 53–58.
4. Vortnykova I.P., Zakhar O.H. Teachers' readiness to use e-portfolios. Information Technologies and Learning Tools. 2021. №81(1). 327–339.
5. Шевчук С.С. Електронне портфоліо як інструмент оцінювання рівня професійної компетентності педагога вищої школи. Імідж сучасного педагога. 2019. № 5(188). 57–63.
6. Долженков О.О., Постоян Т.Г. Технологія портфоліо в аспекті автентичного оцінювання результатів професійної підготовки майбутніх фахівців. Наука і освіта. 2015. 31–36.
7. Hanum S. R., Che-Ani A.I., Johar S., Ismail K., Abd Razak M.Z. ePortfolio: A Descriptive Survey for Contents and Challenges. International Journal of Emerging Technologies in Learning. 2016. №11(01). 4–10.
8. Mgarbi H., Chkouri M.Y., Tahiri A. Purpose and Design of a Digital Environment for the Professional Insertion of Students Based on the E-portfolio Approach. International Journal of Emerging Technologies in Learning. 2022. № 17(01). 36–48.
9. Strudler N., Wetzell K. Electronic Portfolios in Teacher Education: Forging a Middle Ground. Journal of Research on Technology in Education. 2012. №44(2). 161–173.

Vdovychyn T.Ya., Bilyy R.T. GOOGLE SITES DIGITAL TOOL FOR E-PORTFOLIO CREATION

The development of modern society dictates new requirements for potential employees in terms of finding a job. The primary task for specialists is the formation of an autobiography, which will contain data on personal

achievements and results of professional activity. However, the use of digital tools to realize this goal has also found its mark, in particular, the implementation of a "dossier" about oneself in the form of an electronic portfolio (e-portfolio), the popularity of which is constantly growing. An e-portfolio in a digital format stores data or documents certifying the achievements of a specific person, reflecting professional experience and comprehensive development. In contrast to writing an autobiography, an e-portfolio provides an opportunity to accumulate one's achievements in a modern format and breathe in interesting ideas to demonstrate the stages of professional skill development. On the other hand, an e-portfolio allows you to motivate a specialist for continuous self-development and self-education, improvement and self-analysis. Looking back at the previous experience based on the e-portfolio materials, it is possible to carry out a full-fledged analysis of the state of implementation of the professional tasks that are set before this employee.

The article analyzes the concept of "e-portfolio" and its classification, the advantages and disadvantages of its various types, the purpose of creation and functions. The purpose of an e-portfolio for an employee is disclosed and the requirements for its registration are described. The role of the e-portfolio as a tool for self-assessment and self-improvement, systematicity of work, objectivity, reliability of the submitted information and their logical presentation, constant monitoring of professional activity and personal responsibility of the specialist are emphasized.

The article demonstrates the algorithm for creating an e-portfolio for an employee, making a choice among digital tools using the Google Sites service as an example, which allows you to use its functionality for this purpose. Google Sites is more for building sites, but has a Portfolio element in its template gallery that can be used for such purposes. The Portfolio application itself contains a simple and clear interface, that is, the employee does not need to worry about the technical aspects of the chosen digital tool, it is enough only to structure the necessary information, clearly think through the content of the portfolio and use templates to fill it.

Key words: e-portfolio, digital tool, Google Sites.

Дроменко В.Б.

Таврійський національний університет імені В.І. Вернадського

Лісовець С.М.

Таврійський національний університет імені В.І. Вернадського

ОСОБЛИВОСТІ ІНЖЕНЕРІЇ ПРОГРАМНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ПРИ РОЗРОБЛЕННІ СИСТЕМ З ЕЛЕМЕНТАМИ ШТУЧНОГО ІНТЕЛЕКТУ

У даній роботі показано, що розробка систем штучного інтелекту є розширенням програмної інженерії та включає нові процеси й технології, які необхідні для розроблення та розвитку систем штучного інтелекту. Проаналізовано загальні проблеми, які пов'язані з розробленням застосувань штучного інтелекту та машинного навчання з точки зору інженерії програмного забезпечення. Виокремлені та наведені відмінності у процесах інженерії традиційного програмного забезпечення та програмного забезпечення з елементами штучного інтелекту та машинного навчання. Проаналізовано фактори, через які виникають певні проблеми та ризики для розробників програмного забезпечення і які слід брати до уваги при програмній реалізації моделей машинного навчання, щоб зробити цей процес передбачуваним та керованим.

Продемонстрована потреба у гармонізації дисциплін програмної інженерії та штучного інтелекту і машинного навчання з метою інтеграції життєвого циклу моделі штучного інтелекту та машинного навчання у процес розроблення програмного забезпечення.

Для систематизації загальних проблем та практик їх вирішення при розробці програмних систем з елементами штучного інтелекту та машинного навчання проаналізовано характеристики та запропоновані рекомендації для різних етапів життєвого циклу розроблення програмного забезпечення, а також рекомендації стосовно різних аспектів розроблення моделей штучного інтелекту та машинного навчання.

Запропоновані рекомендації допоможуть розробникам підвищити якість та ефективність розроблення моделей штучного інтелекту та машинного навчання, зменшити ризики та забезпечити узгодженість з найкращими практиками.

Ключові слова: інженерія програмного забезпечення, штучний інтелект, машинне навчання, етапи життєвого циклу.

Постановка проблеми. Програмні системи, які використовують елементи штучного інтелекту та машинного навчання, мають свої особливості порівняно з традиційними програмними системами. Через це виникають деякі проблеми та ризики для розробників програмного забезпечення.

Використання штучного інтелекту та машинного навчання для виконання системних функцій відрізняється від їх включення у вихідний код. Прогнозна здатність вбудовується у навчальні дані та використовується обмеженою кількістю викликів функцій. Сучасні методи контрольованого навчання, зокрема, використовують зворотне розповсюдження для налаштування вагових параметрів, що представляють розподіл інформації у глибоких нейронних мережах, з метою ство-

рення моделей штучного інтелекту та машинного навчання. Однак, на відміну від вихідного коду, який може бути розглянутий людиною, моделі штучного інтелекту та машинного навчання є складними конструкціями, які важко інтерпретувати. Це призводить до того, що деякі стандартні практики, такі як перегляд вихідного коду та вичерпне тестування, стають неефективними для моделей машинного навчання.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Стандарт ISO/IEC/IEEE Systems and Software Engineering Vocabulary (SEVOCAB) визначає програмну інженерію як «систематичний та дисциплінований підхід, який можна кількісно виміряти, до розробки, експлуатації та підтримки програмного забезпечення» [1].

Розроблення традиційного програмного забезпечення передбачає створення програмних кодів інженерами у вигляді вихідного коду, який можна розділити на функціональні одиниці, такі як класи, методи, функції тощо.

Системна та програмна інженерія досягли високого рівня зрілості, володіючи значним обсягом знань та практики, необхідної для ефективної розробки. Проте, ключовим викликом для обох галузей є їх адаптація до нових викликів цифрового середовища. Це дозволить створювати сучасні, безпечні, захищені, економічно ефективні та персоналізовані програмні продукти та послуги та зменшити технічну заборгованість таких систем.

Системи, що базуються на штучному інтелекті (англ. *artificial intelligence*, AI), представляють собою програмні системи, які мають принаймні один компонент AI, такий як системи розуміння природної мови, розпізнавання зображень або автономного водіння.

Розробка систем AI є розширенням програмної інженерії та включає нові процеси й технології, що є необхідними для розроблення та розвитку систем AI. На сьогоднішній день більшість систем AI використовують компоненти машинного навчання та не включають у свій склад експертні системи на основі правил, що відображає новий напрямок розвитку AI, зорієнтований на навчання на основі даних.

Машинне навчання (англ. *machine learning*, ML) – це набір статистичних технологій, які дають можливість комп'ютерам працювати з даними без явного програмування [2]. Технології ML поділяються на три основні типи:

- контрольоване навчання (*supervised learning*), де знаходиться відповідність між вхідними та вихідними даними (*input-output*) на основі розмічених даних. Такий тип AI/ML на теперішній час є домінуючим в промислових застосуваннях, хоча вимагає високоякісних даних;

- неконтрольоване навчання (*unsupervised learning*), що визначає шаблони в нерозмічених даних. Типовим застосуванням такого типу AI/ML є кластеризація;

- навчання з підкріпленням (*reinforcement learning*), що базується на використанні системи винагороди для оцінки продуктивності ML. Традиційно такий тип AI/ML застосовується у відеоіграх, але також набув поширення у застосуваннях для тестування програмного забезпечення та побудови самоадаптивних систем.

Наукові дослідження в галузі штучного інтелекту включають інженерію знань, автоматичне

мислення, планування, оптимізацію, обробку природної мови, комп'ютерний зір, видобування шаблонів та інші напрямки. Ці дослідження мають значний вплив на класичні галузі, такі як охорона здоров'я, автомобілебудування, робототехніка, інформатика, відеоігри та фінанси, допомагаючи у розробці рішень для експертів та автоматизації промислових процесів [3, 4].

З іншого боку, методи контрольованого та неконтрольованого навчання є основними напрямками алгоритмів у штучному інтелекті та машинному навчанні для вирішення різних завдань, таких як класифікація, кластеризація, регресія, прогнозування або зменшення розмірності даних. Однак, досвід показує, що штучний інтелект та машинне навчання можуть бути успішно застосовані і в інших областях, таких як виявлення шаблонів, інтелектуальний аналіз даних, виявлення шахрайства або формування рекомендацій. Після встановлення наукових основ та технологічної підтримки для рішення завдань штучного інтелекту та машинного навчання через багато варіантів застосування в різних галузях, увага наукової спільноти зосереджується на визначенні нових обчислювальних моделей, таких як розподілений штучний інтелект, навчання з підкріпленням, метанавчання або багатоагентні системи.

Метою статті є аналіз загальних проблем, пов'язаних з розробленням застосувань штучного інтелекту та машинного навчання з точки зору інженерії програмного забезпечення. Оскільки розробка таких застосувань вимагає чітко визначеного процесу, розглянемо виклики та запропонуємо рекомендації для різних етапів життєвого циклу розроблення програмного забезпечення. Також проаналізуємо характеристики та розробимо рекомендації стосовно різних аспектів розроблення моделей штучного інтелекту та машинного навчання.

Виклад основного матеріалу дослідження. Життєвий цикл моделі штучного інтелекту та машинного навчання можна розглядати як процес, у якому потрібно працювати з даними, вибирати відповідну модель залежно від типу задачі та наявних даних, навчати та тестувати модель з різними конфігураціями та показниками продуктивності, а потім керувати навченою моделлю. Хоча цей процес може здаватися достатньо простим, на практиці виявляється, що це не так. Його складність полягає у потребі автоматизувати дії, які зазвичай виконуються вручну. Як і при розробці традиційних програмних систем, застосування інженерних принципів спрямоване на досягнення двох основних

покращень: забезпечення здатності до розвитку та підтримання життєвого циклу моделі штучного інтелекту та машинного навчання. Це особливо важливо, оскільки оцінка витрат і зусиль при розробці функцій штучного інтелекту та машинного навчання є неформалізованою.

Кожна функція штучного інтелекту та машинного навчання концептуально визначається, реалізується, перевіряється та працює протягом свого життєвого циклу, який складається з кількох етапів. Функція штучного інтелекту та машинного навчання може розглядатися як «чорна скринька», яка надає зовнішній інтерфейс операцій, які реалізовані через взаємодію між чотирма процесами, що складають життєвий цикл моделі штучного інтелекту та машинного навчання: керування даними, створення моделі, навчання та тестування, експлуатація (див. рис. 1).

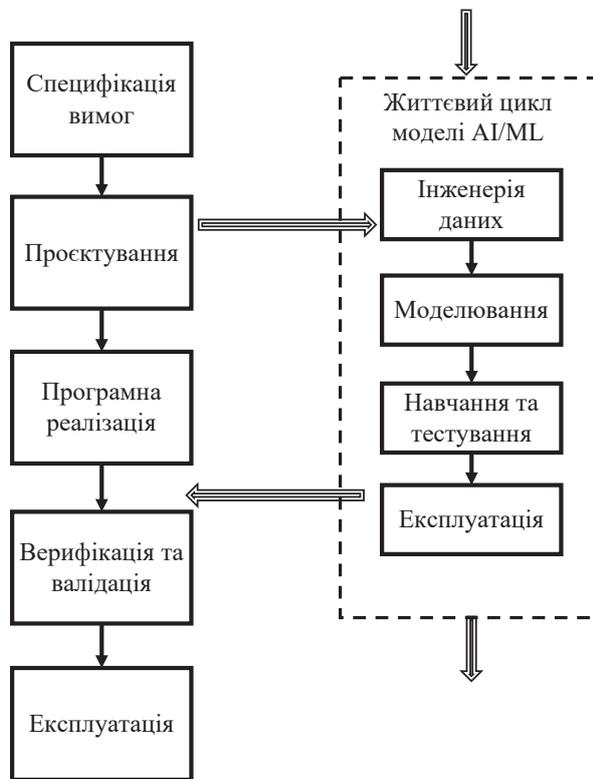


Рис. 1. Структурна схема загального процесу інженерії програмного забезпечення та життєвого циклу моделі штучного інтелекту та машинного навчання

З точки зору системної інженерії, функція штучного інтелекту та машинного навчання та її життєвий цикл представляють собою тип прозорої функціональності. Першим кроком у включенні функції штучного інтелекту та машинного навчання у процес розроблення систем є від-

криття «чорної скриньки» і чітке представлення всіх процесів життєвого циклу штучного інтелекту та машинного навчання та їх взаємозв'язків для різних процесів технічної розробки. Для цього кожен процес повинен бути абстрактно описаним та стандартизованим, щоб концептуально описувати як дані, так і операції.

Операціоналізація та стандартизація практики розроблення програмного забезпечення є необхідними для економічно ефективного розвитку високоякісних та надійних систем штучного інтелекту та машинного навчання. Тому для досліджень та практичного застосування необхідно мати консолідований масив знань, що пов'язує проблеми та практики програмної інженерії, застосовані до розроблення систем штучного інтелекту та машинного навчання.

Програмні системи, переважно, специфікуються, проєктуються та впроваджуються у відповідності до дедуктивного та детерміністичного підходу, що означає різні подання (логічні, фізичні та процесні) для представлення та керування системою. Інтелектуальні системи, проте, можуть мати певну недетермінованість у своїй поведінці, оскільки деякі їхні частини керуються автоматичними процесами, базованими на даних, що врешті ускладнює окремі технічні процеси, такі як верифікація та валідація системи.

Таким чином, стає очевидною потреба у гармонізації дисциплін програмної інженерії та штучного інтелекту і машинного навчання з метою інтеграції життєвого циклу моделі штучного інтелекту та машинного навчання у процес розроблення програмного забезпечення. Отже, розробники програмного забезпечення повинні бути свідомі до різних проблем або ризиків, пов'язаних з програмними системами, що містять елементи штучного інтелекту та машинного навчання. Для систематизації загальних проблем та практик їх вирішення при розробці програмних систем з елементами штучного інтелекту та машинного навчання, розглянемо процес розроблення з двох точок зору:

- 1) розроблення програмного забезпечення;
- 2) розроблення моделі штучного інтелекту та машинного навчання.

Відмінності у процесах інженерії звичайного програмного забезпечення та програмного забезпечення з елементами штучного інтелекту та машинного навчання демонструє рис. 2.

Програмні системи, які містять компоненти штучного інтелекту та машинного навчання, потребують чітко визначеного процесу розро-

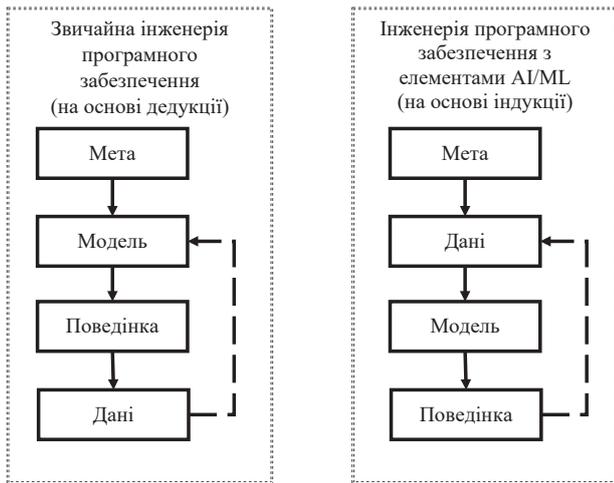


Рис. 2. Відмінності у процесах інженерії традиційного програмного забезпечення та програмного забезпечення з елементами штучного інтелекту та машинного навчання

блення та підтримки, але через унікальні характеристики систем штучного інтелекту та машинного навчання, етапи розроблення програмного забезпечення потребують адаптації для врахування конкретних вимог AI/ML.

1. Розроблення вимог. Крім традиційних дій з розроблення вимог, таких як аналіз, збір, специфікація та перевірка, розроблення вимог до систем штучного інтелекту та машинного навчання включає і специфічні вимоги. Низька якість вимог може призвести до численних проблем на подальших етапах [5]. Специфікація вимог до систем штучного інтелекту та машинного навчання є складним завданням в силу їхньої частої змінюваності. Тому, для мінімізації проблем етапу розроблення вимог, слід звернути увагу на наступні аспекти:

- аналіз доступних даних, оскільки важливо переконатися, що наявні дані придатні для забезпечення передбачуваних рішень на основі AI/ML. Тому, для ефективного формулювання вимог, крім фахівців із предметної області розроблюваної системи, потрібно залучати експертів з аналізу даних. Крім того, прототипування моделі штучного інтелекту та машинного навчання набуває особливої цінності, оскільки допомагає зрозуміти, які результати можна очікувати на основі доступних даних;

- формулювання вимог має бути чітким і враховувати як загальні вимоги до системи (наприклад, до швидкодії, забезпечуваної безпеки, надійності тощо), так і до результатів моделі AI/ML (наприклад, точність результатів, правдивість). Вимоги до систем AI/ML можуть часто змінюва-

тися, тому розробники мають періодично переглядати та уточнювати їх;

- взаємодія з кінцевими користувачами є ключовим для адекватного визначення вимог, оскільки запізно виявлені пропущені вимоги можуть суттєво підвищити вартість розроблюваної системи;

- адаптація до зміни вимог з урахуванням того, що частота змін вимог до систем AI/ML може бути вищою, ніж до інших частин програмної системи, тому важливо регулярно переглядати та адаптувати їх.

2. Проектування програмного забезпечення для систем з елементами штучного інтелекту та машинного навчання має свої особливості [6] через непередбачувану поведінку програм та велику кількість потрібних даних, на відміну від традиційних програмних систем, які мають кінцеву кількість станів і поведінка їх є передбачуваною. Розробка систем AI/ML має враховувати обмеження та накладні витрати на обробку даних. Алгоритми для машинного навчання розвиваються швидко темпами, тому дизайн програми AI/ML має бути гнучким, щоб прийняти ці зміни.

Попри відсутність змін у вимогах або відсутність помилок, з часом може погіршуватися продуктивність програм AI/ML. Отож, складно стає передбачити потреби в обслуговуванні програм AI/ML. Це означає, що проєкт має бути достатньо гнучким, щоб відповідати частим змінам. Наприклад, у випадку додавання можливостей AI/ML до наявної програми проєкт має передбачати мінімальні зміни наявної архітектури системи. Крім того, проєкт нової програмної системи з елементами AI/ML має бути гнучким для адаптації майбутніх змін.

На етапі проектування систем AI/ML важливо врахувати наступні рекомендації:

- використання модульних архітектурних стилів завдяки поділу системи на модулі дозволяє краще розподілити завдання та забезпечити можливість повторного використання коду. Загальна система будується інтеграцією взаємодійних компонентів, які є набором функцій для вирішення чітко визначеної задачі;

- гнучкість проєкту через швидку зміну вимог та даних систем з елементами машинного навчання. Тому, проєкт має бути достатньо гнучким, щоб вносити зміни з мінімізацією зусиль та витрат;

- слабка залежність конструкції компонентів надає можливість мінімізувати потенційні витрати на супроводження. Це дозволяє розвивати компоненти незалежно один від одного;

– обробка великих обсягів даних має бути передбачена проектом з відповідними механізмами у системі;

– стратегії інтеграції повинні бути чітко визначені у проєкті або в проєктній документації, оскільки моделі або компоненти машинного навчання мають бути інтегровані через відповідні інтерфейси.

Ці рекомендації допоможуть забезпечити ефективну розробку та підтримку програмних систем з елементами штучного інтелекту та машинного навчання.

3. На етапі **реалізації** програмного забезпечення з елементами штучного інтелекту та машинного навчання виникають складнощі із забезпеченням сумісності та цілісності системи [6], враховуючи різноманітність фреймворків і бібліотек для реалізації програм з елементами AI/ML. Такі моделі є «чорною скринькою», тому важко пояснити, а, відповідно, важко чітко усвідомити, чому вони працюють або не працюють.

Реалізація програмних систем AI/ML має враховувати вимоги цільової платформи при виборі фреймворків і бібліотек, оскільки середовище розроблення для моделей AI/ML може відрізнитися від робочого середовища. Слід також враховувати, що вибір реалізації має забезпечувати максимальну портативність, сумісність і адаптивність програм штучного інтелекту та машинного навчання з меншою вартістю.

Таким чином, для етапу реалізації є очевидними наступні рекомендації:

– спрямованість на використання цілісного набору фреймворків і бібліотек;

– врахування цільової платформи щодо сумісності, масштабованості та портативності програми.

4. Етап **інтеграції** має забезпечити функціональну цілісність системи шляхом об'єднання компонентів системи до єдиної узгодженої системи із бажаними функціями [7]. Інтеграція програм AI/ML може відбуватись за принципом двоетапного процесу: спочатку інтеграція компонентів підсистеми AI/ML, а потім інтеграція підсистем AI/ML з іншими підсистемами цільової системи. Тож, на процес і складність фази інтеграції може впливати визначений інтерфейс між компонентами AI/ML та іншими компонентами. Враховуючи, що моделі AI/ML і надалі постійно розвиватимуться, робочий процес AI/ML повинен сприяти безперервній інтеграції моделей AI/ML.

Тому на етапі інтеграції доречно врахувати такі рекомендації:

– для забезпечення функціональної цілісності системи інтеграція повинна об'єднувати компоненти системи таким чином, щоб забезпечити функціональну цілісність системи;

– врахування постійного розвитку моделей штучного інтелекту та машинного навчання і сприяння робочого процесу безперервній інтеграції моделей.

5. Етап **тестування**. Оскільки результати моделей машинного навчання мають стохастичний характер, виникають проблеми з отриманням детермінованих результатів для порівняння та перевірки програм машинного навчання [8]. З цієї причини наявні фреймворки модульного тестування не можуть бути використані для програм AI/ML. Крім того, моделі AI/ML навчаються на вхідних даних адаптивним та ітеративним способом і залежать від багатьох параметрів, таких як обрані функції, архітектура моделі та, навіть, дані навчання. Правила, які створені системами AI/ML, можуть бути невідомі розробникам. Все це значно ускладнює виявлення неправильної поведінки системи та точне визначення джерела помилок.

Необхідно також враховувати, що алгоритми AI/ML іноді можуть бути стійкими до певних помилок і надавати прийнятні результати шляхом помилок реалізації або компенсації «зашумлених» даних. Це також ускладнює виявлення та виправлення помилок в системі AI/ML. Тестування програмних систем AI/ML може потребувати великої кількості навчальних даних, а маркування таких даних вручну є витратним заходом. Крім того, випадковий вибір підмножин даних, ймовірно, не зможе визначити багато граничних випадків. Вищезазначені проблеми роблять тестування та виправлення неправильної поведінки в системах AI/ML достатньо складною задачею.

На етапі тестування слід брати до уваги наступні рекомендації:

– моделі штучного інтелекту та машинного навчання є непрозорими з важкопояснюваною поведінкою, тому вони потребують ретельного тестування для всіх можливих сценаріїв використання та в широкому діапазоні параметрів;

– помилки в системах штучного інтелекту та машинного навчання досить важко виявити через стохастичний характер моделей, тому всі підсистеми мають бути ретельно протестовані на рівні модульного та інтеграційного тестування.

6. Етап **розгортання** запускає програмну систему до експлуатації. Як правило, цей етап оновлює або замінює наявну систему, де може вини-

кати потреба в додаванні нових функціональних модулів програм машинного навчання до наявної системи [9]. Під час розгортання системи AI/ML слід враховувати, що платформа та інфраструктура для експлуатації системи можуть мати відмінності від середовища, в якому була навчена та оцінена модель AI/ML. Через такі відмінності можуть виникнути проблеми сумісності, переносності та масштабованості, що значною мірою може вплинути на продуктивність системи.

Очевидні рекомендації, які слід брати до уваги на етапі розгортання:

- урахування відмінностей платформ між середовищами розроблення та експлуатації під час розгортання системи штучного інтелекту та машинного навчання;

- врахування вимог до переносності та масштабованості при розгортання систем штучного інтелекту та машинного навчання в експлуатаційному середовищі;

- обережне розгортання систем штучного інтелекту та машинного навчання для мінімізації впливу на користувачів.

Відмінності у характеристиках та вимогах програмних систем AI/ML потребують чітко визначеного набору принципів і рекомендацій. Слід пам'ятати, що алгоритми машинного навчання пропонують рішення загального призначення. Лише вірне формулювання задачі дозволить визначити адекватний алгоритм, адже невірне формулювання задачі може призвести до принципової неможливості коректної роботи програмної системи AI/ML. Отже, правильна постановка задачі є запорукою успіху інших етапів розроблення систем AI/ML.

При *формулюванні задачі* слід спиратись на наступне:

- чітке розуміння очікуваних результатів та характеристик даних, на якому базується правильне формулювання задачі машинного навчання;

- достатнє розуміння розробниками алгоритмів машинного навчання для вибору найбільш підходящого алгоритму для конкретної задачі.

Збір даних є критичними накладними витратами для машинного навчання через їх великі обсяги даних. Але, недостатня кількість даних також є проблемою для програмних систем AI/ML. Збір і обробка великого обсягу даних мають бути зосереджені на представництві повного діапазону поведінки (повноті), правильності даних (точності), відсутності суперечливих даних (узгодженості) та відповідності поточному стану сис-

теми (своєчасності) даних для забезпечення їх якості. Однак, підтримка якості даних вимагає ретельного збору, контролю та обслуговування даних, що часто є дорогавартісним з огляду на час і пов'язані з цим обчислювальні роботи.

Тому, слід враховувати наступне щодо *збору даних*:

- забезпечення повноти, точності, узгодженості і своєчасності даних в процесі збору даних;

- гнучкість процесу збору даних для адаптації до змін структури даних, яка може змінюватися з часом;

- аналіз вимог до даних перед початком збору може зекономити час і ресурси в подальшому процесі машинного навчання.

Необроблені дані потребують *попередньої обробки* з метою очищення, організації та трансформації (за потреби), оскільки можуть бути непридатними для використання в моделях машинного навчання. Головною проблемою для алгоритмів машинного навчання вважаються саме необроблені дані, оскільки вони можуть негативно впливати на процес навчання та отримані результати. Попередня обробка даних є важливим та трудомістким етапом для машинного навчання в силу того, що потребуватиме значних витрат часу та зусиль.

Отже, при *попередній обробці* даних слід врахувати такі рекомендації:

- очищення, заповнення відсутніх значень та інші необхідні перетворення забезпечують якість даних;

- максимізація повторного використання оброблених даних, оскільки попередня обробка може бути спільною для кількох елементів AI/ML.

Виділення ознак спрямоване на оптимальне перетворення вхідних даних у вектори ознак для алгоритмів машинного навчання. Цей етап виокремлює набір ознак, які найкраще представляють приховані характеристики даних для машинного навчання і спрямований на усунення потенційних шумів і надмірності даних. Отримання даних у «низькорозмірному» поданні збільшує швидкість навчання та дозволяє зробити результати роботи алгоритмів машинного навчання візуальними. Проте, некоректно обрані ознаки можуть суттєво погіршити отримувані за допомогою реалізованих моделей результати.

При *виділенні ознак* слід врахувати, що:

- якість набору ознак суттєво впливає на продуктивність моделей машинного навчання, тому розробники повинні виокремити найкращий набір ознак;

– створення автоматизованого конвеєра для виділення ознак дозволить автоматизувати процес виділення ознак та ефективно використовувати час та ресурси;

– ознаки потрібно очистити від забруднень, оскільки це може негативно вплинути на продуктивність моделей;

– мінімізація кількості ознак в наборі, який зберігає приховані в даних властивості, оскільки кількість виділених ознак пов'язана зі складністю моделей;

– періодичний перегляд наборів ознак для підтримки їх актуальності і ефективності.

Побудова моделі AI/ML відбувається на основі конкретних алгоритмів машинного навчання в залежності від поставленої задачі та характеристик даних шляхом використання наявних моделей з бібліотек або створенням власних моделей. В подальшому моделі ітераційно навчаються, доки не досягнуть бажаного рівня продуктивності. Поширеною проблемою для моделей AI/ML є так зване «перенавчання», коли модель добре працює на навчальному наборі даних, але погано узагальнюється з іншими даними. Причиною такого може стати занадто складна модель. Рішенням подолання проблеми є знаходження найпростішої моделі, яка забезпечує потрібну продуктивність. Проте, скоріш за все, занадто прості моделі машинного навчання будуть недостатніми і зафіксувати приховані закономірності в даних не зможуть. Також слід враховувати і розподіл даних, який має бути збалансованим, інакше висновок моделі зміщуватиметься в бік класу, що є домінуючим в навчальних даних.

Таким чином, основними рекомендаціями при *побудові моделі* є:

– адаптація алгоритмів машинного навчання у відповідності до конкретної задачі та характеристик даних;

– градація складності моделі (починаючи з найпростіших рішень та поступовий перехід до складніших), збалансовуючи компроміс між ресурсами та продуктивністю;

– важливо забезпечити якість і збалансований розподіл даних, щоб уникнути зміщення висновків моделі в бік домінуючого класу;

– перед розробкою нових моделей розгляд можливості повторного використання наявних рішень для підвищення продуктивності.

Оцінка моделей машинного навчання відбувається шляхом їх застосування до верифікаційного набору даних, який є відокремленим від набору даних для навчання. Оскільки через зміни в харак-

теристиках вхідних даних з часом продуктивність може знижуватись, важливим є не лише оцінювання перед розгортанням, а й безпосередньо моніторинг продуктивності після розгортання. Тобто, щоб адаптуватися до змін моделі машинного навчання можуть потребувати оновлення (наприклад, перенавчання) і тоді оцінка моделей машинного навчання може стати ітеративною протягом життєвого циклу. Крім того, в програмній системі AI/ML можуть бути застосовані різні взаємодіючі моделі. Отже, продуктивність окремих моделей може являти лише частину наскрізних сценаріїв і важливо отримати оцінки як на рівні окремих моделей, так і на рівні всієї системи.

При *оцінюванні моделей* слід дотримуватися наступних рекомендацій:

– повний набір верифікаційних даних, щоб представляти різноманітні можливі сценарії використання;

– оцінка моделі повинна містити не лише точність, а й інші характеристики, такі як пропускання здатність, використання ресурсів і масштабованість;

– оцінка продуктивності як на рівні окремих моделей, так і на рівні всієї системи при взаємодії різних моделей.

Наступним кроком життєвого циклу для навчальних моделей є їх *інтеграція* до цільової системи з метою об'єднання всіх необхідних компонентів (наприклад, моделей, конвеєрів введення-виведення). Застосування кількох моделей може потребувати визначення та реалізації інтерфейсів для кожної окремої моделі для забезпечення їхньої взаємодії з іншими моделями та компонентами. Поширеним підходом є розгортання моделей машинного навчання як сервісів (*service*) з доступом до сервісів через API. При розгортанні моделей ML слід враховувати портативність і сумісність моделей щодо цільової платформи.

Під час *інтеграції та розгортання* моделей доречними будуть такі рекомендації:

– при інтеграції компонентів машинного навчання важливо забезпечити функціональну цілісність програмних систем AI/ML;

– під час розгортання моделей слід враховувати сумісність і портативність платформ розроблення та експлуатації;

– розгортання моделей машинного навчання повинно забезпечити плавні зміни в наявній системі без впливу на користувача або бізнес-процеси.

Управління моделлю машинного навчання поєднує її навчання, підтримку, розгортання,

моніторинг і документування, що з точки зору робочого процесу є складним завданням. Моделі ML керуються даними та базуються на різноманітних припущеннях щодо розподілу та шаблонів даних. При цьому початкові характеристики даних можуть не зберігатися через зміни в даних, і це, з великою ймовірністю, вплине на поведінку моделі. Таким чином, важливо контролювати продуктивність розгорнутих моделей шляхом відстежування зміни в характеристиках даних, а також перенавчанням та повторної перевірки моделі. Для реалізації такого контролю потрібні ітерації життєвого циклу моделі машинного навчання, що вимагає великих витрат часу та ресурсів.

Також важливим є забезпечити відстеження версій моделі, наборів даних і конфігурації, що забезпечить відтворюваність моделей машинного навчання, а, відповідно, і полегшить керування робочим процесом. Відтворюваність моделі буде корисною для аналізу та порівнювання поведінки та продуктивності моделі, а також підтримки рішення щодо розгортання.

Слід дотримуватися таких рекомендацій щодо управління моделлю:

- моніторинг продуктивності розгорнутих моделей та забезпечення їхньої підтримки після розгортання;
- відстеження змін в характеристиках даних та розподілі даних для ефективного управління моделлю;
- забезпечення версіонування моделей, даних і конфігурацій, а також належне документування кожної фази життєвого циклу системи AI/ML для полегшення відтворюваності та підтримки моделей машинного навчання.

Етика в розробці AI/ML спрямована на зменшення негативних наслідків впровадження елементів штучного інтелекту та машинного навчання в різні сфери застосування програмного забезпечення. Дослідники та практики повинні відповідально використовувати AI, а при дослідженні та розробці програмної системи AI/ML, слід дотримуватися стандартного кодексу етики програмної інженерії [10].

Загалом, рекомендації щодо етики в розробці AI є наступними:

– відповідальне використання штучного інтелекту за принципами етики при розробленні програмних систем AI/ML;

– збереження конфіденційності та безпеки особистих і бізнесових даних під час використання AI/ML;

– пріоритет колективного добробуту над бізнес-вигодами при використанні AI/ML.

Висновки. В силу того, що останнім часом відслідковується значне зростання інтересу до програмних систем з елементами штучного інтелекту та їх застосування в різноманітних бізнесових сферах, врахування специфічних особливостей таких технологій у життєвому циклі розроблення програмного забезпечення є ключовим для забезпечення успішності та ефективності проєктів.

Життєвий цикл розроблення програмного забезпечення сьогодення є достатньо формалізованим завдяки визнаним добіркам рекомендацій та найкращих практик. Проте, при розробленні програмних систем з елементами AI/ML такі рекомендації потребують певних модифікацій.

Інженерія програмного забезпечення з елементами штучного інтелекту та машинного навчання потребує глибокого розуміння як основ програмування, так і алгоритмів машинного навчання. Такий підхід допомагає забезпечити не лише функціональність системи, але й її відповідність бізнес-потребам та етичним нормам.

З цією метою в роботі проаналізовано особливості розроблення систем з елементами AI/ML з точки зору інженерії програмного забезпечення, виокремлені відмінності у процесах інженерії традиційного програмного забезпечення та програмного забезпечення з елементами штучного інтелекту та машинного навчання. Крім того, проаналізовано фактори, які слід брати до уваги при програмній реалізації моделей машинного навчання, щоб збити цей процес передбачуваним та керованим.

В подальшому докладні системні рекомендації до процесу розроблення програмного забезпечення з елементами AI/ML стануть практично корисними для команд, які працюють у цій сфері. Ці рекомендації допоможуть підвищити якість та ефективність розроблення, зменшити ризики та забезпечити узгодженість з найкращими практиками.

Список літератури:

1. Сайт SEVOCAB: Software and Systems Engineering Vocabulary [Електронний ресурс]. – Режим доступу: https://pascal.computer.org/sev_display/index.action
2. Харченко В. О. Основи машинного навчання : навч. посіб. / В. О. Харченко. – Суми : Сумський державний університет, 2023. 264 с.

3. Alvarez-Rodriguez J. M., Zuniga R. M., Pelayo V. M., Llorens, J. Challenges and opportunities in the integration of the Systems Engineering process and the AI/ML model lifecycle. In INCOSE International Symposium. 2019, Vol. 29, no. 1. P. 560-575.
4. Challa H., Niu N., Johnson R. Faulty Requirements Made Valuable: On the Role of Data Quality in Deep Learning. IEEE Seventh International Workshop on Artificial Intelligence for Requirements Engineering (AIRE). 2020. P. 61-69.
5. Vogelsang A., Borg M. Requirements Engineering for Machine Learning: Perspectives from Data Scientists. IEEE 27th International Requirements Engineering Conference Workshops (REW). 2019. P. 245-251.
6. Washizaki H., Khomh F., Gueheneuc Y.-G., Takeuchi H., Natori N., Doi T., Okuda S. Software-Engineering Design Patterns for Machine Learning Applications. Computer. 2022. Vol. 55, no. 3. P. 30-39.
7. Martinez-Fernandez S., Bogner J., Franch X., Oriol M., Siebert J., Trendowicz A., Vollmer A. M., Wagner S. Software Engineering for AI-Based Systems: A Survey. ACM Transactions on Software Engineering and Methodology. 2022. Vol. 31, no. 2, article 37e.
8. Nishi Y., Masuda S., Ogawa H., Uetsuki K. A Test Architecture for Machine Learning Product. IEEE International Conference on Software Testing, Verification and Validation Workshops (ICSTW). 2018. P. 273-278.
9. Paleyes A., Urma R.-G., Lawrence N. D. Challenges in Deploying Machine Learning: a Survey of Case Studies. ACM Computing Surveys. 2022, April. Available at: <https://dl.acm.org/doi/10.1145/3533378> [Accessed: 26.04.2024].
10. Code of Ethics. IEEE-CS/ACM Joint Task Force on Software Engineering Ethics and Professional Practices. 1999. Available from: <https://www.computer.org/education/code-of-ethics> [Accessed: 26.04.2024].

Dromenko V.B., Lisovets S.M. FEATURES OF SOFTWARE ENGINEERING IN THE DEVELOPMENT OF SYSTEMS WITH ELEMENTS OF ARTIFICIAL INTELLIGENCE

This work shows that the development of artificial intelligence systems is an extension of software engineering and includes new processes and technologies that are necessary for the development and development of artificial intelligence systems. The general problems associated with the development of artificial intelligence and machine learning applications from the point of view of software engineering are analyzed. The differences in the engineering processes of traditional software and software with elements of artificial intelligence and machine learning are highlighted and given. The factors that cause certain problems and risks for software developers and which should be taken into account in the software implementation of machine learning models in order to make this process predictable and manageable are analyzed.

The need to harmonize the disciplines of software engineering and artificial intelligence and machine learning in order to integrate the life cycle model of artificial intelligence and machine learning into the software development process is demonstrated.

In order to systematize common problems and practices for solving them in the development of software systems with elements of artificial intelligence and machine learning, the characteristics and proposed recommendations for various stages of the software development life cycle were analyzed, as well as recommendations regarding various aspects of the development of artificial intelligence and machine learning models.

The proposed guidelines will help developers improve the quality and efficiency of AI and machine learning model development, reduce risk, and ensure alignment with best practices.

Key words: software engineering, artificial intelligence, machine learning, life cycle stages.

УДК 62.64

DOI <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2024.4/13>**Заболотний О.В.**Національний аерокосмічний університет імені М.Є. Жуковського
«Харківський авіаційний інститут»**Сіроклин В.П.**Національний аерокосмічний університет імені М.Є. Жуковського
«Харківський авіаційний інститут»**Нікулін С.С.**Національний аерокосмічний університет імені М.Є. Жуковського
«Харківський авіаційний інститут»**РОЗРОБКА АПАРАТНО-ПРОГРАМНОГО КОМПЛЕКСУ
ДЛЯ ТЕСТУВАННЯ БОЙОВИХ КВАДРОКОПТЕРІВ:
ПІДВИЩЕННЯ НАДІЙНОСТІ І ЕФЕКТИВНОСТІ
У СУЧАСНІЙ ВІЙСЬКОВІЙ ТЕХНОЛОГІЇ**

Надійність функціонування квадрокоптерів в умовах сучасного бою є критично важливою. Для забезпечення високого рівня надійності необхідно ретельно тестувати алгоритми управління та системи квадрокоптера на землі. Ця робота присвячена створенню наземного випробувального комплексу для систем квадрокоптерів. Запропонований комплекс базується на карданному підвісі, який дозволяє імітувати тривимірні рухи квадрокоптера під час тестування. До складу комплексу входять: платформа системи позиціонування квадрокоптера, незалежна система вимірювання параметрів орієнтації, виконавчі механізми для завдання просторового положення, а також керуючий комп'ютер, який забезпечує роботу комплексу та здійснює точну оцінку рухів квадрокоптера на основі даних, отриманих від системи орієнтації та вимірювальних систем. У статті представлено результати початкового етапу розробки всіх структурних елементів комплексу, включаючи проектування та тестування основних модулів, а також інтеграцію різних систем для забезпечення синхронізованої роботи. Керуючий комп'ютер використовує спеціалізоване програмне забезпечення для аналізу даних з датчиків і забезпечує зворотний зв'язок для корекції рухів квадрокоптера. Комплекс дозволяє імітувати різні сценарії польоту та оцінювати реакцію систем квадрокоптера. Завдяки цьому підходу можна значно підвищити надійність та ефективність використання квадрокоптерів у реальних бойових умовах. Описано аспекти створення та налаштування випробувального комплексу, розглянуто вибір компонентів, проектування та виготовлення платформи позиціонування, синтез програмного забезпечення для керуючого комп'ютера, інтеграцію систем вимірювання та орієнтації, а також випробування комплексу в різних умовах. Комплекс розроблено з урахуванням можливості масштабування та адаптації для різних типів квадрокоптерів і сценаріїв випробувань. Окрему увагу надано забезпеченню потрібної точності вимірювань та відтворюваності результатів випробувань. Це дозволяє проводити комплексні тести систем управління та навігації квадрокоптера, оцінювати його реакцію на різні типи навантажень та впливів, що імітують реальні умови експлуатації. Важливим моментом є можливість автоматизованого збирання і аналізу даних, що значно підвищує ефективність процесу тестування та дозволяє швидко виявляти і усувати недоліки у функціонуванні квадрокоптера.

Ключові слова: апаратно-програмний комплекс, тестування, система позиціонування, квадрокоптер, проектування, надійність функціонування, наземне випробування, карданний підвіс, оцінка рухів, імітація сценаріїв польоту.

Постановка проблеми. Застосування квадрокоптерів у сучасній війні має високу актуальність і може істотно вплинути на тактику і стратегію бойових дій. Практика збройного конфлікту в Україні дала можливість виділити такі основні сфери, де квадрокоптери показали високу ефективність:

а) розвідка та спостереження, коли квадрокоптери використовують для отримання розвідувальної інформації, включаючи спостереження за ворожими позиціями, виявлення прихованих об'єктів, моніторинг руху військ та транспорту, а також для оцінки місцевості та об'єктів на ній (оснащення

сенсорами різних типів, камерами, тепловізорами та радіоелектронним обладнанням);

б) ударні дії, під час яких квадрокоптери можуть бути носіями легкого озброєння, такого як протипіхотні або протитанкові гранати (постріли), для точного удару по ворожих цілях (ефективно для нейтралізації загроз у важкодоступній для звичайних засобів ураження місцевості та зонах);

в) контрзаходи, коли квадрокоптери також використовують для боротьби з ворожими безпілотними літальними апаратами (БПЛА), наприклад, для перехоплення або знищення ворожих дронів, постановки радіоелектронних перешкод;

г) психологічний тиск, у випадку, коли присутність квадрокоптерів у повітрі може створювати моральний тиск на ворога, викликаючи тривогу та невизначеність у його лавах.

Однак варто зазначити, що використання квадрокоптерів також пов'язане з деякими обмеженнями та ризиками, такими як схильність до перехоплення, можливість ураження протиповітряним вогнем і ускладнення в управлінні за наявності засобів ворожої електронної боротьби.

Наведені вище аргументи дозволяють сформулювати пункти актуальності теми розробки стендів для тестування бойових квадрокоптерів, а саме:

а) тестування функціональності та надійності, адже стенди надають контрольоване середовище для перевірки функцій та надійності квадрокоптерів і можуть використовуватися для симуляції різних умов, включаючи погодні умови, вплив ворожого вогню та електромагнітні перешкоди;

б) тестування безпеки та стійкості, коли стенди дозволяють проводити випробування на безпеку та стійкість квадрокоптерів, включаючи їх здатність виживати в умовах механічних пошкоджень або впливу засобів ППО;

в) розробка та тестування нових технологій, таких як автономне керування, системи навігації, засоби виявлення тощо;

г) навчання та тренування, адже стенди дозволяють проводити навчання та тренування операторів квадрокоптерів в умовах, максимально наближених до реальних бойових ситуацій, що допомагає підвищити професіоналізм та ефективність.

д) економічна ефективність, адже тестування на стендах може бути більш ефективним з економічної точки зору, ніж проведення польових випробувань, особливо при тестуванні великих обсягів обладнання або при необхідності повторюваності результатів.

Аналіз останніх досліджень і публікацій.

Останніми роками квадрокоптерам приділяється все більше уваги, оскільки вони зручніші, ніж пілотовані літальні апарати, і можуть більш гнучко виконувати різні завдання, але рівень аварійності для квадрокоптерів набагато вищий, ніж для пілотованих літальних апаратів, через недосконалу технологію обладнання та відсутність ефективного управління працездатністю та діагностики бортових систем [1, 2]. Оскільки квадрокоптерам потрібно літати на різних висотах і протягом відносно тривалого періоду часу, бортове обладнання має бути якомога легшим, щоб перевозити більше корисного навантаження, що обмежує складність діагностичних систем квадрокоптерів. Довший час польоту також збільшує ймовірність відмови. Саме через зазначені обставини потрібен ефективний діагностичний підхід.

Система керування польотом, що відповідає за виконання завдань польоту, є ядром квадрокоптера. Порівнюючи фактичний стан квадрокоптера, вказаний даними датчиків, з бажаним станом, вона посилає команди виконавчим механізмам, щоб фактичний стан відповідав бажаному стану, завершуючи замкнений процес управління [3, 4]. Датчики надають дані до системи управління польотом для проведення аналізу та генерації команд управління, а невірні дані датчиків призведуть до помилкових команд та небажаних наслідків. Крім того, датчики польоту часто піддаються впливу тиску і температури повітря, що швидко змінюється, що збільшує ймовірність їх поломки. Тому виявлення несправностей датчиків квадрокоптерів дуже важливе для забезпечення виконання завдань польоту.

В останні роки було розроблено ряд підходів до виявлення несправностей датчиків, які можна розділити на дві основні категорії: підходи на основі моделі та підходи, основані на отриманих даних [5, 6].

Підходи на основі моделі можуть досягти високої продуктивності виявлення та надати детальну інформацію про несправності, яку можна інтерпретувати, якщо буде отримана точна фізична модель досліджуваної системи [7, 8, 9]. Однак, створити таку модель для квадрокоптера досить складно, що обмежує можливості цього підходу [10, 11].

У порівнянні з підходами, заснованими на моделі, методи, основані на отриманих даних не потребують усвідомлення складних фізичних механізмів і можуть найкращим чином використовувати інформацію, отриману від датчи-

ків. Несправності можуть бути точно виявлені різними підходами, заснованими на даних та на основі зміни характеристик даних [14, 15].

Спираючись на зазначені підходи розробляють і сучасні комплекси для тестування квадрокоптерів на базі аеродинамічних [16, 17] та дротяних підвісів [18, 19], проте, як показує практика їх застосування, вони мають обмеження на обертальний рух за осями крену та тангажу.

У зв'язку з цим, в Національному аерокосмічному університеті розпочато роботи зі створення апаратно-програмного комплексу тестування квадрокоптерів на основі карданного підвісу, з метою забезпечення повноцінного обертального руху та розробки нових методик тестування.

Постановка завдання. Метою статті є розгляд ключових аспектів проектування апаратно-програмного комплексу для тестування квадрокоптерів. Апаратно-програмний комплекс повинен забезпечувати обертальний рух квадрокоптера за трьома ступенями свободи з мінімальними обмеженнями на кути обертання.

Виклад основного матеріалу.

1. Структура апаратно-програмного комплексу

Апаратно-програмний комплекс складається з платформи системи позиціонування, призначеної для розміщення квадрокоптера, незалежної виміральної системи, призначеної для визначення параметрів орієнтації квадрокоптера під час випробувань, вітрогенератора, здатного імітувати вплив атмосферних факторів, і комплексу, що складається з керуючого комп'ютера, що використовується для моніторингу системи (рисунок 1).

На початку випробувань квадрокоптер встановлюється на платформу системи позиціонування. Через нерівномірний розподіл ваги тестованого квадрокоптера платформа системи позиціонування може бути розбалансована під дією гравітаційних моментів, що виникають через невідповідність між центром ваги платформи та центром обертання підвісу. Тому платформа системи позиціонування повинна бути оснащена системою балансування. Для активації бортових систем квадрокоптера необхідно подати живлення, для чого на платформі має бути встановлено відповідний роз'єм.

При тестуванні квадрокоптера дані про його кутове положення повинні бути передані на керуючий комп'ютер. Для цього на платформі системи позиціонування використовують радіоканал передачі даних. Отримані дані кутового положення порівнюють з незалежними вимірюваннями параметрів орієнтації квадрокоптера для отримання

точних прогнозів. У зв'язку з цим апаратно-програмний комплекс повинен бути доповнений незалежною системою вимірювань.



Рис. 1. Склад апаратно-програмного комплексу

2. Проектування апаратно-програмного комплексу

2.1. Карданний підвіс

На початковому етапі проектування апаратно-програмного комплексу будуть розглянуті основні етапи проектування карданного підвісу, як показано на рисунку 2.



Рис. 2. Конструкція карданного підвісу

Конструкція підвісу складається з трьох рам. Перша рама дозволяє пристрою обертатися навколо осі нахилу γ (крену), друга рама дозволяє йому обертатися навколо осі нахилу θ (тангажу), а третя рама, по суті, є платформою для системи позиціонування та дозволяє їй обертатися навколо осі нахилу ψ (нишпорення). Усі три рами можуть обертатися на 360° .

Кожна рама складається з алюмінієвого профілю, з'єднаного гвинтами через розпірки. Кожна

рама шарнірно з'єднана з наступною, щоб забезпечити обертання навколо осі. Для зменшення тертя у з'єднаннях використовують сферичні роликові підшипники. Вибір алюмінієвого сплаву для конструкції підвісу обумовлений забезпеченням легкості та довговічності.

Випробувальний стенд оснащений приводами крокових двигунів для автоматичної орієнтації рамок карданного підвісу.

У процесі проектування кардана бажано проаналізувати напружено-деформований стан під дією навантажень від квадрокоптера. Цей аналіз напружки-деформації було виконано за допомогою програмного забезпечення SolidWorks. Стенд, що розробляється, буде використовуватися для квадрокоптерів вагою до 5 кг. У процесі розрахунку напружено-деформованого стану критичну масу навантаження вибирають із запасом у 1,5 рази більшим від початкової маси.

2.2. Платформа системи позиціонування

Платформа системи позиціонування розташована на першій рамі кардана і використовується для кріплення квадрокоптера. Платформа системи позиціонування включає систему стабілізації, силовий модуль і радіолінію передачі даних.

2.2.1. Система балансування

Система балансування стабілізує платформу системи позиціонування, зменшуючи дисбаланс або відстань між центром маси платформи та центром обертання підвісу до такого значення, коли результуючий обертальний момент сили тяжіння не впливає на положення платформи.

Система стабілізації реалізована як набір вантажів різної маси, які можна механічно переміщувати, розміщених у різних місцях на платформі системи позиціонування. Балансування є повторюваним процесом зі зворотним зв'язком і гарантує, що центр ваги вирівнюється з центром обертання, поки амплітуда коливань навколо центру обертання не зменшиться.

Дисбаланс системи можна визначити як величину асиметрично розподіленої маси, виражену в грамах на міліметр або кілограмах на метр, або як відхилення центру маси платформи від центру обертання системи, виражене в міліметрах. Для вимірювання дисбалансу використовують набір акселерометрів і гіродатчиків, зазвичай встановлених на корпусі платформи системи позиціонування.

З усіх наявних на ринку акселерометрів, MEMS акселерометри найкраще підходять для використання у складі системи стабілізації завдяки високій чутливості та точності вимірювання параметрів низькочастотної вібрації та руху об'єктів [20].

2.2.2. Модуль живлення

Усі пристрої на платформі системи позиціонування, включаючи квадрокоптер, живляться від розподільника електроенергії потужністю не нижче сумарного споживання електроенергії всіх компонентів платформи системи позиціонування (крокових двигунів системи позиціонування (12 В), логічних пристроїв бортової системи керування (5 В) і пристроїв бездротової передачі даних (5 В)), та необхідних рівнів вхідної напруги квадрокоптерів (зазвичай 11,5 В, 14,8 В або 22,2 В).

2.2.3. Бездротовий канал передачі даних

Бездротові канали будуть реалізовані за допомогою радіочастотних приймачів, що працюють на частоті 2,4 ГГц і забезпечують швидкість передачі даних до 3 Mbps. Такі пристрої в протоколі Bluetooth представлені приймачами серії Bluetooth 5.0 BLE.

2.3. Незалежна вимірювальна система

Незалежна вимірювальна система – це група високоточних пристроїв, поєднаних із програмним забезпеченням, яке обробляє вихідні сигнали для автономного визначення поточних параметрів орієнтації квадрокоптера під час тестування.

Більшість розробників випробувальних стендів не мають незалежної системи вимірювань і покладаються на результати вимірювань, отримані з самого квадрокоптера. Одним з можливих варіантів створення незалежної вимірювальної системи є використання оптичних датчиків або цифрових камер. В даний час існують способи відновлення орієнтації об'єкта за зображеннями однієї або кількох камер [21, 22]. Для цього на досліджуваному приладі наносять спеціальні світлові позначки у вигляді опорних точок або ліній (рисунок 3). При використанні $n \geq 3$ опорних точок, які не знаходяться на одній лінії, алгоритм P_nP може успішно використовуватися для визначення орієнтації об'єктів на зображенні [23, 24]. Алгоритм, наведений у [25, 26], використовується для визначення орієнтації об'єктів на основі лінійних міток.

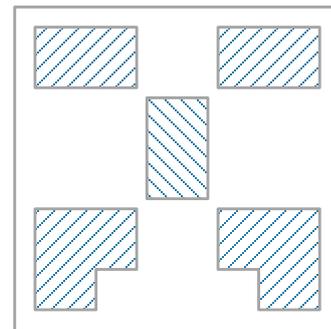


Рис. 3. Мітка системи незалежних вимірювань

Загалом, алгоритм визначення орієнтації складається з наступних кроків:

- а) бінаризація та фільтрація зображення;
- б) вибір орієнтира на зображенні та визначення координат його центру в системі координат детектора камери (для точкових орієнтирів) або параметрів лінії (для лінійних орієнтирів);
- в) визначення орієнтації об'єкта за співвідношенням координат знака в системі координат камери і системі координат досліджуваного приладу.

Слід зазначити, що камеру необхідно відкалібрувати перед аналізом зображень.

Що стосується побудови незалежної вимірювальної системи, то в цій роботі було віддано перевагу використанню оптичних датчиків на основі прецизійних екодерів, розташованих взаємно перпендикулярно до трьох осей карданного підвісу спільно з інерційним вимірювальним блоком (IMU), який поєднує 3-осьовий гіроскоп і 3-осьовий акселерометр, а також 3-осьовий магнітометр.

2.4. Бортова система керування

Бортова система керування – це логічний пристрій, що керує роботою системи автоматичного керування орієнтацією рами карданного підвісу, виконавчими механізмами якого є крокові двигуни, керування трактом передачі радіоінформації та модулем живлення.

Обчислювальних ресурсів логічних пристроїв бортової системи управління повинно бути достатньо для прийому, обробки та передачі даних, а також для роботи програмного забезпечення автоматичного орієнтування. Цим вимогам відповідає мікроконтролер Atmega2560 (8-розрядний високопродуктивний мікроконтролер AVR з низьким енергоспоживанням), частотою 16 МГц і 256 КБ енергонезалежної пам'яті.

Взаємозв'язок між апаратними та програмними компонентами для тестування квадрокоптерів показано на рисунку 4.

2.5. Керуючий комп'ютер

Керуючий комп'ютер забезпечує зв'язок із квадрокоптером і дозволяє, серед іншого, задавати команди для активації системи орієнтації в різних режимах роботи, задавати різні режими роботи гвинтокрилого комплексу, а також приймати й обробляти дані від датчиків квадрокоптера. Комп'ютер керування використовується для збору та обробки даних незалежної вимірювальної системи та визначення фактичного положення квадрокоптера, що тестується. Потім керуючий комп'ютер оцінює його кутове положення, порівнюючи розрахований напрямок, надісланий квадрокоптером, із фактичним напрямком. Апаратно-програмний комплекс та

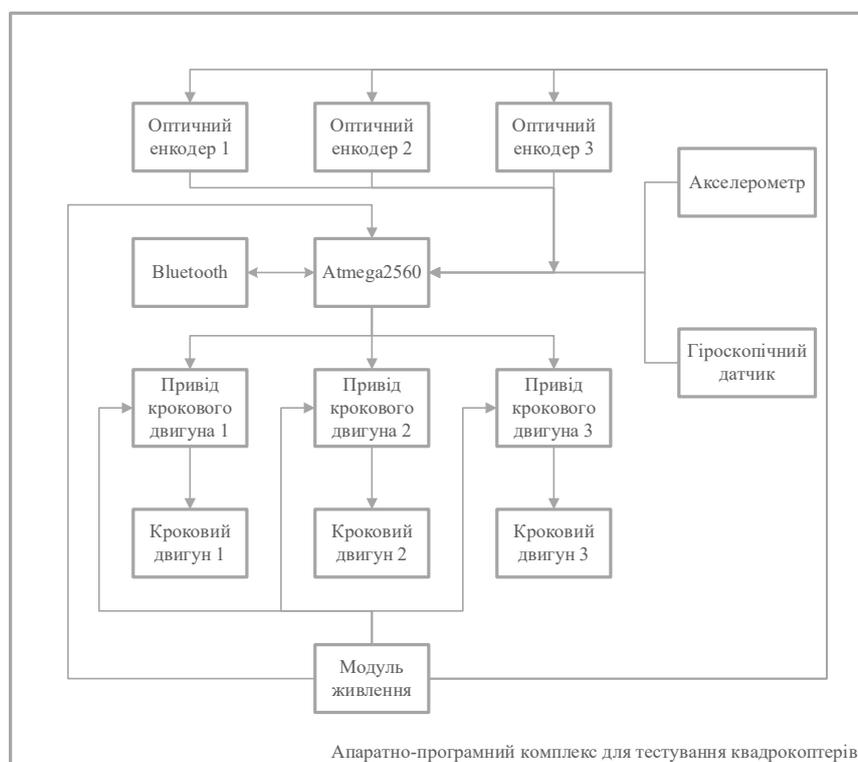


Рис. 4. Компоненти апаратно-програмного комплексу для тестування квадрокоптерів

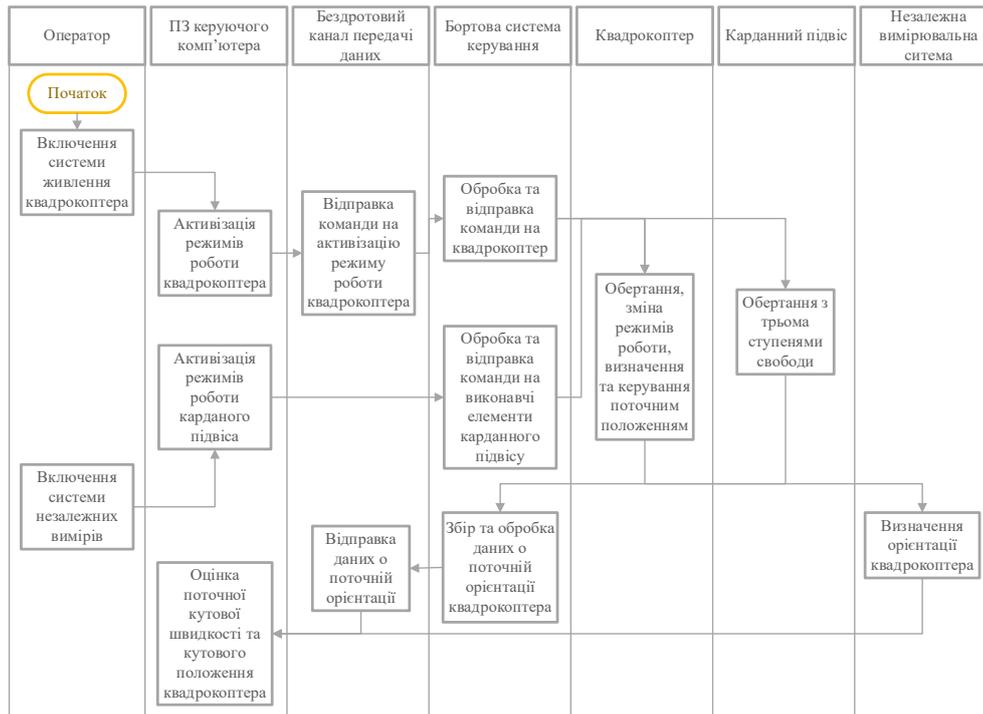


Рис. 5. Алгоритм роботи апаратно-програмного комплексу та керуючого комп'ютера для випробувань квадрокоптерів

алгоритм роботи керуючого комп'ютера наведено на рисунку 5.

Висновки. У статті розглянуто питання початкової стадії проектування апаратно-програмного комплексу для тестування квадрокоптерів у Національному аерокосмічному університеті імені М. Є. Жуковського «Харківський авіаційний інститут».

У подальшому, основні дослідження у проекті будуть пов'язані з розробленням нових методик та алгоритмів тестування квадрокоптерів, методик самодіагностики та інших технічних засобів.

В результаті впровадження апаратно-програмного комплексу переваги перед наявними аналогами виглядатимуть наступним чином:

а) в сфері розроблення нових алгоритмів калібрування (на відміну від аналога [27]) будуть використані методи штучного інтелекту для автоматизації та оптимізації калібрування, що дозволить покращити точність та ефективність цього процесу;

б) у частині розроблення систем автоматизованого тестування, запропонована система буде використовувати технології машинного навчання та аналізу даних для автоматичного виконання різних тестів та генерації детальних звітів про результати, що дозволить суттєво покращити швидкість та точність тестування;

в) у частині розроблення методики самодіагностики (на відміну від аналога [28], де існуюча система має обмежені можливості самодіагностики та непрозорі методи виявлення проблем) нові методики будуть базуватись на методах аналізу даних, що дозволить виявляти та виправляти проблеми у реальному часі і забезпечить підвищену надійність та безпеку роботи квадрокоптерів.

В комплексі, запропонований апаратно-програмний комплекс забезпечить ефективне тестування бойових квадрокоптерів з метою підвищення надійності та ефективності експлуатації останніх.

Список літератури:

1. Wang, B.; Liu, D.; Wang, W.; Peng, X. A hybrid approach for UAV flight data estimation and prediction based on flight mode recognition. *Microelectron. Reliab.* 2018, 84, 253–262.
2. Avram, R.C.; Zhang, X.; Campbell, J.; Muse, J. IMU sensor fault diagnosis and estimation for quadrotor UAVs. *IFAC-PapersOnLine* 2015, 48, 380–385.
3. Khalastchi, E.; Kalech, M.; Kaminka, G.A.; Lin, R. Online data-driven anomaly detection in autonomous robots. *Knowl. Inf. Syst.* 2015, 43, 657–688.

4. Suarez, A.; Heredia, G.; Ollero, A. Cooperative Virtual Sensor for Fault Detection and Identification in Multi-UAV Applications. *J. Sens.* 2018, 2018, 4515828.
5. Wang, L.; Li, M.; Liu, L.; Liu, D. Exhaust gas temperature sensing data anomaly detection for aircraft auxiliary power unit condition monitoring. In *Proceedings of the 2018 International Conference on Sensing, Diagnostics, Prognostics, and Control (SDPC)*, Xi'an, China, 15–17 August 2018.
6. Gao, Z.; Cecati, C.; Ding, S.X. A survey of fault diagnosis and fault-tolerant techniques Part I: Fault diagnosis. *IEEE Trans. Ind. Electron.* 2015, 62, 3768–3774.
7. Ortiz-Torres, G.; López-Estrada, F.R.; Reyes-Reyes, J.; García-Beltrán, C.D.; Theilliol, D. An Actuator Fault Detection and Isolation method design for Planar Vertical Take-off and Landing Unmanned Aerial Vehicle modelled as a qLPV system. *IFAC-PapersOnLine* 2016, 49, 272–277.
8. Abbaspour, A.; Aboutalebi, P.; Yen, K.K.; Sargolzaei, A. Neural adaptive observer-based sensor and actuator fault detection in nonlinear systems: Application in UAV. *ISA Trans.* 2017, 67, 317–329.
9. López-Estrada, F.R.; Ponsart, J.C.; Theilliol, D.; Zhang, Y.; Astorga-Zaragoza, C.M. LPV Model-Based Tracking Control and Robust Sensor Fault Diagnosis for a Quadrotor UAV. *J. Intell. Robot. Syst. Theory Appl.* 2016, 84, 163–177.
10. Liu, D.; Yin, X.; Song, Y.; Liu, W.; Peng, Y. An on-line state of health estimation of lithium-ion battery using unscented particle filter. *IEEE Access* 2018, 6, 40990–41001.
11. Zhang, Y.; Liu, L.; Peng, Y.; Liu, D. An Electro-Mechanical Actuator motor voltage estimation method with a feature-aided Kalman Filter. *Sensors* 2018, 18, 4190.
12. Liu, D.; Song, Y.; Li, L.; Liao, H.; Peng, Y. On-line life cycle health assessment for lithium-ion battery in electric vehicles. *J. Clean. Prod.* 2018, 199, 1050–1065.
13. Liu, L.; Wang, S.; Liu, D.; Peng, Y. Quantitative selection of sensor data based on improved permutation entropy for system remaining useful life prediction. *Microelectron. Reliab.* 2017, 75, 264–270.
14. Zhao, G.; Liu, X.; Zhang, B.; Liu, Y.; Niu, G.; Hu, C. A novel approach for analog circuit fault diagnosis based on deep belief network. *Measurement* 2018, 121, 170–178.
15. Zhao, R.; Wang, D.; Yan, R.; Mao, K.; Shen, F.; Wang, J. Machine Health Monitoring Using Local Feature-Based Gated Recurrent Unit Networks. *IEEE Trans. Ind. Electron.* 2018, 65, 1539–1548.
16. Veyna, U.; Garcia-Nieto, S.; Simarro, R.; Salcedo, J.V. Quadcopters Testing Platform for Educational Environments. *Sensors* 2021, 21, 4134. <https://doi.org/10.3390/s21124134> (дата звернення: 12 червня 2024 року)
17. Schwartz J.L. The distributed spacecraft attitude control system simulator : PhD Thesis – Virginia Polytechnic Institute and State University , 2004. 134 p.
18. Mukras, S.M.S.; Omar, H.M. Development of a 6-DOF Testing Platform for Multirotor Flying Vehicles with Suspended Loads. *Aerospace* 2021, 8, 355. <https://doi.org/10.3390/aerospace8110355> (дата звернення: 7 лютого 2024 року)
19. Bhargava A. Development of a quadrotor testbed for control and sensor development : Master Thesis – Clemson University , 12-2008. 522 p.
20. Чернев О. Л. Сенсорі вібрації та улового положення: практичний підручник/ Чернев О. Л., Грищенко В. А. – К.: Техніка, 2010. 213с.
21. Hartley R. Multiple View geometry in computer vision . – Cambridge : Cambridge University Press, 2003. 656 p.
22. Paragios N, Chen Y. Handbook of Mathematical Models in Computer Vision – NY: Springer Science + Business Media, 2006. 606 p.
23. Quan L, Lan Z. Linear N-point Camera Pose Determination // *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 1999, Vol. 21(8), pp. 774-780.
24. Chou S., Gao X. Complete solution classification for the perspective-three-point problem // *IEEE Trans. on Pattern Analysis and Machine Intelligence*. 2003. Vol. 25(8). P. 930-43.
25. Lijuan Qin, Dongzhi Cao, Yulan Hu, Yingzi Wei, Yue Zhou and H. Wang, Algorithm for attitude determination from three door-like lines, 2008 International Conference on Information and Automation, Changsha, China, 2008, pp. 1359-1363, doi: 10.1109/ICINFA.2008.4608213
26. J. S. .-C. Yuan, "A general photogrammetric method for determining object position and orientation," in *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, vol. 5, no. 2, pp. 129-142, April 1989, doi: 10.1109/70.88034
27. M. Jovanović and D. Lazić, Sensor Calibration via Wireless Sensor Networks One Possible Approach, 2024 23rd International Symposium INFOTEH-JAHORINA (INFOTEH), East Sarajevo, Bosnia and Herzegovina, 2024, pp. 1-4, doi: 10.1109/INFOTEH60418.2024.10495985
28. V. Sadhu, K. Anjum and D. Pompili, On-Board Deep-Learning-Based Unmanned Aerial Vehicle Fault Cause Detection and Classification via FPGAs, in *IEEE Transactions on Robotics*, vol. 39, no. 4, pp. 3319-3331, Aug. 2023, doi: 10.1109/TRO.2023.3269380.

Zabolotnyi O.V., Siroklyn V.P., Nikulin S.S. DEVELOPMENT OF A HARDWARE-SOFTWARE COMPLEX FOR COMBAT QUADCOPTERS TESTING: IMPROVING RELIABILITY AND EFFICIENCY IN MODERN MILITARY TECHNOLOGY

The reliability of quadcopters in modern combat conditions is critically important. To ensure a high level of reliability, it is necessary to thoroughly test the control algorithms and quadcopter systems on the ground. This work is dedicated to creating a ground-based test complex for quadcopter systems. The developed complex is based on a gimbal that allows simulating three-dimensional movements of the quadcopter during testing. The complex includes a quadcopter positioning system platform, an independent orientation parameter measurement system, actuators for setting spatial positions, and a control computer that ensures the operation of the complex and performs accurate assessment of the quadcopter's movements based on data obtained from the orientation and measurement systems. The article presents the results of the initial development stage of all components of this complex, including the design and testing of the main modules, as well as the integration of various systems to ensure synchronized operation. The control computer uses specialized software to analyze sensor data and provides feedback for correcting the quadcopter's movements. The complex allows simulating various flight scenarios and evaluating the quadcopter systems' response to these conditions. This approach can significantly improve the reliability and efficiency of quadcopters in real combat conditions. The paper describes aspects of creating and setting up the test complex. This includes the selection of components, the design and manufacturing of the positioning platform, the development of software for the control computer, the integration of measurement and orientation systems, and the testing of the complex under various conditions. The complex is being developed with scalability and adaptability for different types of quadcopters and test scenarios in mind. Special attention is paid to ensuring high measurement accuracy and reproducibility of test results. This allows comprehensive testing of the quadcopter's control and navigation systems, evaluating its response to various types of loads and impacts that simulate real operating conditions. An important aspect is the ability to automate data collection and analysis, which significantly increases the efficiency of the testing process and allows quick identification and correction of deficiencies in the quadcopter's performance.

Key words: hardware-software complex, testing, positioning system, quadcopter, design, operational reliability, ground testing, gimbal, movement assessment, flight scenario simulation.

УДК 681.3.06

DOI <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2024.4/14>**Зилевіч М.О.**Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»**Заїченко В.Д.**Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

РОЗРОБКА ВИМІРЮВАЛЬНОГО КОМПЛЕКСУ СТАНУ АТМОСФЕРНОГО ПОВІТРЯ

У даній статті розглянуто принцип роботи вимірювального комплексу стану атмосферного повітря на базі мікроконтролерів STM32, проведено аналіз наявних рішень на ринку та визначено вимоги до проектування вимірювального комплексу. Досліджено принцип роботи вимірювальних комплексів на базі STM32 мікроконтролера, який завдяки своїй високій продуктивності, низькому енергоспоживанню та можливості інтеграції з різними датчиками є одним з найпопулярніших рішень на ринку. Розглянуто процеси збору даних з датчиків, їх обробки та відображення на LCD-екрані.

Розглянуто принципи функціонування та проведено порівняльний аналіз сучасних вимірювальних комплексів, що використовують різні типи датчиків для моніторингу погодних умов. Порівняно технічні характеристики та функціональні можливості цих пристроїв, внаслідок чого визначено, які аспекти дизайну і функціональності є найбільш важливими для сучасного ринку. Визначено, що комплекс повинен вимірювати температуру, вологість, атмосферний тиск та рівень пилу з високою точністю. Важливими елементами є надійність, захист від несприятливих умов, компактність і енергоефективність. Особливу увагу приділено вибору датчиків та захисним функціям, що включають захист від перевантаження та перегріву.

Для розробки використовуються високоякісні компоненти, такі як датчик DPS310 для вимірювання тиску, датчик температури та вологості DHT22, а також датчик пилу PMP3003 для моніторингу вмісту пилу в повітрі. Взаємодія з дисплеєм здійснюється через інтерфейс I2C. Збір даних забезпечується мікроконтролером STM32, який обробляє дані з датчиків та виводить їх на екран. Живлення системи здійснюється через USB-порт, що дозволяє легко підключати метеостанцію до комп'ютера або іншого джерела живлення.

Завдяки відносно низькій вартості компонентів і простоті виготовлення, даний вимірювальний комплекс може бути використаний для створення прототипів і невеликих партій обладнання в різних промислових і наукових галузях.

Ключові слова: вимірювальний комплекс, мікроконтролер, друкована плата, надійність, температурно-вологісний датчик, барометр, лазерний датчик пилу.

Постановка проблеми. У сучасному світі, де глобальні зміни клімату та антропогенний вплив стають все більш відчутними, моніторинг стану навколишнього середовища набуває критично важливого значення. Відтак, вимірювальні комплекси стали одним з основних інструментів у багатьох сферах людської діяльності, таких як сільське господарство, екологічний моніторинг, метеорологія та промисловість. Створення функціональних систем для точного моніторингу навколишніх погодних умов стає все більш важливим завданням. Наприклад, сучасні екологічні проекти потребують точних систем вимірювання для забезпечення моніторингу якості повітря та погодних умов.

Такі системи дозволяють здійснювати безперервний моніторинг важливих екологічних параметрів, забезпечуючи користувачів актуальною інформацією для прийняття обґрунтованих рішень. Розробка високоточної та енергоефективної системи для моніторингу стану атмосферного повітря із використання сучасного мікроконтролера та високоякісних датчиків дозволить досягти високої точності вимірювань та оперативного виведення даних на LCD екран. Це забезпечує можливість безперервного моніторингу та аналізу параметрів у реальному часі.

Вимірювальний комплекс, може бути використаний у різних галузях, таких як сільське господарство, екологічний моніторинг, метеорологія та

промисловість. Завдяки відносно низькій вартості компонентів і простоті виготовлення, ця система може бути використана для створення прототипів і невеликих партій обладнання. Вона сприятиме глибшому розумінню кліматичних процесів та допоможе у своєчасному виявленні потенційно небезпечних екологічних ситуацій, тим самим підвищуючи рівень безпеки та комфорту населення.

Створення вимірювального комплексу стану атмосферного повітря на основі сучасної елементної бази є важливим кроком у напрямку впровадження сучасних технологій для моніторингу та аналізу навколишнього середовища, що відкриває широкі перспективи для подальшого розвитку екологічно стійких рішень.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Останні дослідження в області розробки вимірювальних комплексів стану атмосферного повітря показують значний прогрес у використанні технологій IoT, мікроконтролерів, та сучасних методів аналізу даних. Впровадження низькоенергоспоживаючих та автономних систем з використанням сонячних панелей дозволяє створювати ефективні та надійні рішення для моніторингу якості повітря.

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

У дослідженнях [1,2] акцент робиться на використанні технологій IoT для створення систем моніторингу якості повітря. Це включає використання різних датчиків для вимірювання параметрів якості повітря, таких як концентрація CO₂, температури, вологості, та частинок пилу. Інтернет-речей забезпечує передачу даних у реальному часі на віддалені сервери для аналізу.

Останні дослідження [3-5] показують, що мікроконтролери STM32 є популярним вибором для розробки вимірювальних комплексів завдяки їх високій продуктивності, низькому енергоспоживанню та можливості інтеграції з різними сенсорами.

У багатьох публікаціях [6,7] розглядаються різні типи сенсорів, їх принципи роботи, точність, і надійність. Сенсори для вимірювання рівня забруднення повітря, таких як PM_{2.5}, NO₂, SO₂, та O₃, отримали значну увагу.

Активно вивчаються [8,9] новітні типи сенсорів, включаючи оптичні, електрохімічні та напів-

провідникові датчики, які можуть точно вимірювати параметри довкілля, такі як температура, вологість, тиск, концентрації різних газів та пилу.

Постановка завдання. Постановка завдання. Метою роботи є розробка вимірювального комплексу стану атмосферного повітря на основі мікроконтролера STM32, оснащеного датчиками вологості, температури, атмосферного тиску та вмісту пилу в повітрі. Така система дозволить здійснювати безперервний моніторинг важливих екологічних параметрів, забезпечуючи користувачів актуальною інформацією для прийняття обґрунтованих рішень.

Виклад основного матеріалу дослідження. Вимірювальні комплекси стану атмосферного повітря є системами призначеними для збору, обробки та аналізу метеорологічних даних. Ці пристрої грають важливу роль у багатьох сферах діяльності, від прогнозування погоди до моніторингу навколишнього середовища та забезпечення безпеки в різних галузях. Основними галузями застосування таких комплексів є метеорологія та кліматологія, сільське господарство, екологія та охорона навколишнього середовища, будівництво та архітектура та транспорт і логістика.

Незалежно від типу, більшість комплексів складаються з чотирьох основних блоків.

Вимірювальний блок: датчики, що вимірюють різні параметри, такі як температура, вологість, атмосферний тиск, швидкість і напрямок вітру, рівень опадів, концентрація пилу тощо.

Операційний блок: мікроконтролер, що відповідає за обробку даних, отриманих від датчиків, збереження і їх подальшу передачу.

Комунікаційний блок: передача зібраних даних на центральний сервер або інші пристрої для подальшого аналізу та використання.

Блок живлення: забезпечує безперервне функціонування комплексу від батарей, сонячних панелей або мережевого джерела живлення залежно від типу і вимог.

Вимірювальні комплекси на базі мікроконтролерів STM32 використовують передові технології для точного вимірювання та аналізу метеорологічних даних. Принцип роботи таких метеостанцій складається з етапів збору даних з датчиків та їх обробки (аналогово-цифрове перетворення, фільтрація даних) та аналізу і збереження даних (локальне на карту пам'яті або на віддалений сервер зберігання).

Остаточний етап включає відображення зібраних та оброблених даних для користувача. Дані можуть бути відображені на екрані безпересадно

підключений до комплексу або через вебінтерфейс на підключених пристроях [10].

Ринок метеостанцій на мікроконтролерах STM32 пропонує широкий вибір рішень для різних потреб та бюджетів. Вибір конкретного варіанту залежить від вимог до точності вимірювань, наявності модулів зв'язку та можливостей розширення. Важливо враховувати як технічні характеристики, так і зручність у використанні та налаштуванні вимірювального комплексу.

На рисунку 1 зображено структурну схему вимірювального комплексу, а далі розглянуто створення та аналіз структурної схеми.

Схема складається з блоку обробки даних, а також вхідного і вихідного відповідно.

Вхідний блок містить систему керування, набір датчиків та акумулятор. Керування пристроєм та зчитування даних з датчиків здійснюється через мікроконтролер за допомогою GPIO.

Система керування складається з кнопок (інтерфейс користувача), які взаємодіють з мікроконтролером для виконання команд та управління функціями пристрою.

Акумулятор використовується для живлення пристрою та забезпечення його незалежності від джерела живлення. Він може бути заряджений через USB або інший джерела, а містить систему захисту та контролю заряду.

Блок обробки даних працює з даними, яка надійшла від вхідного блоку. Оброблена інформація передається до вихідного блоку для відображення її на дисплеї.

Вихідний блок містить LCD дисплей та SD-карту для виведення та збереження інформації відповідно. Дисплей підключений до мікроконтролера за допомогою протоколу I2C, що дозволяє передавати дані між мікроконтролером та дисплеєм з використанням мінімальної кількості проводів, що спрощує підключення і споживання енергії. SD-карта використовується для збереження додаткових даних, таких як журнали вимірювань, налаштування користувача або інші параметри. Вона підключена до мікроконтролера за допомогою протоколу SPI, що дозволяє швидко передачу даних між мікроконтролером та SD-картою.

Вибір мікроконтролера. Використання мікроконтролеру STM32 є обґрунтованим з ряду причин: Широкий вибір моделей: У лінійці STM32 є багато різних моделей з різними можливостями та характеристиками, що дозволяє вибрати той, який найкраще відповідає вашим потребам.

Потужність та продуктивність: Мікроконтролери STM32 мають потужні обчислювальні можливості, що дозволяють їм ефективно обробляти дані від різних датчиків та керувати роботою пристрою. Наприклад, STM32 може мати тактову частоту до 72 МГц (у випадку моделей на базі ARM Cortex-M3), що забезпечує швидку обробку даних. Крім того, STM32 має багато вбудованих периферійних пристроїв, таких як ADC (аналогово-цифровий конвертер) для зчитування аналогових сигналів від датчиків, а також різні інтерфейси, такі як UART, SPI та I2C, для зв'язку



Рис. 1. Структурна схема пристрою

з зовнішніми пристроями. Такі можливості роблять STM32 ідеальним вибором для проекту зі збору та обробки даних [11].

Датчик температури та вологості. На основі даних з (табл. 1) обрано датчик DHT22 є цифровим сенсором для вимірювання температури та вологості. Він має високу точність вимірювань температури та вологості, що забезпечує надійні дані для моніторингу стану атмосферного повітря. Однодротовий інтерфейс значно спрощує процес інтеграції датчика з мікроконтролером. Використання GPIO для підключення дозволяє зменшити кількість необхідних проводів і спрощує монтаж системи [12].

Порівнюючи датчики для проекту було обрано DPS310. Це цифровий датчик атмосферного тиску, розроблений для вимірювання тиску в атмосфері та навколишньому середовищі. Він є високоточним сенсором, призначеним для застосування в мобільних пристроях, приладах IoT і системах моніторингу [13].

Датчик концентрації пилу. На основі даних з (табл. 3) обрано PMS3003 – це цифровий датчик концентрації пилу. Він призначений для вимірювання концентрації часток пилу у повітрі з розміром від 0,3 мікрона до 10 мікронів на кубічний метр. Датчик має високу точність вимірювання і здатний працювати у широкому діапазоні умов [14].

Для включення та вимикання комплексу можна обрати кнопку з інтерфейсом GPIO, яка підключа-

ється безпосередньо до мікроконтролера. Одним з прикладів такої кнопки є кнопка з фізичним інтерфейсом “push-button”, яка забезпечує просте натискання для включення та вимикання пристрою.

Для проекту обраний LCD дисплей 16x2 з інтерфейсом I2C модель JHD162A. Цей дисплей має розмір 16 символів на 2 рядки і працює з протоколом I2C, що спрощує підключення до мікроконтролера і зменшує кількість потрібних контактів [15].

Для автономного живлення можна розглянути літій-іонний акумулятор зі спеціальним захистом та вбудованим зарядним контролером. Один з варіантів – літій-іонний акумулятор 18650 з захистом. Ємність може варіюватися, але для запропонованого комплексу достатньо акумулятору з ємністю від 2000 до 3000 мАгод.

Проектування друкованого вузла. Друковані плати є основними елементами електронної техніки, що використовуються для з'єднання та монтажу електронних компонентів. Залежно від кількості шарів провідних елементів на платі та їх розташування, друковані плати можна поділити на кілька типів.

Одношарові друковані плати (ОДП) мають провідний рисунок лише на одній стороні ізоляційної основи. Вони дешевші та простіші у виготовленні, однак обмежені в складності схем і кількості компонентів, які можуть бути розміщені на платі [16].

Таблиця 1

Порівняння аналогів датчиків температури та вологості

| Параметр | DHT22 | DHT11 | SHT31 | AM2302 |
|-----------------------------------|-----------------|--------------|-----------------|----------------|
| Напруга живлення, В | 3.3 - 5.5 | 3.3 - 5.5 | 2.4 - 5.5 | 3.3 - 5 |
| Струм споживання, мА | 0.1 | 0.5 | 0.5 | 1 |
| Точність температури, °С | ±0.5 | ±2 | ±0.2 | ±0.5 |
| Діапазон вимірювання температури, | -40°C до +125°C | 0°C до +50°C | -40°C до +125°C | -40°C до +80°C |
| Точність вологості, % | ±2 | ±5 | ±2 | ±5 |
| Діапазон вимірювання вологості, % | 0 до 100 | 20 до 80 | 0 до 100 | 0 до 100 |

Датчик атмосферного тиску.

Таблиця 2

Порівняння аналогів датчиків атмосферного тиску

| Параметр | BMP280 | BME280 | MS5611 | DPS310 |
|---------------------------------|------------|------------|------------|-----------|
| Напруга живлення, В | 1.71 - 3.6 | 1.71 - 3.6 | 1.71 - 3.6 | 1.7 - 3.6 |
| Струм споживання, мА | 2.7 | 2.7 | 1 | 0.5 |
| Точність тиску, Па | ±1.0 | ±1.0 | ±10 | ±0.002 |
| Діапазон вимірювання тиску, гПа | 300-1100 | 300-1100 | 10-1200 | 300-1200 |

Таблиця 3

Порівняння аналогів датчиків концентрації пилу

| Параметр | PMS5003 | SDS011 | PMS3003 | SDS011 |
|----------------------|-----------------------------|-----------------------------|-----------------------------|-----------------------------|
| Напруга живлення | 3 В | 3 В | 3 В | 3 В |
| Струм споживання | 100 мА | 120 мА | 80 мА | 150 мА |
| Точність | ±10% | ±15% | ±15% | ±10% |
| Діапазон вимірювання | 0.3 - 10 мкм/м ³ | 0.3 - 10 мкм/м ³ | 0.3 - 10 мкм/м ³ | 0.3 - 10 мкм/м ³ |

Двошарові друковані плати (ДДП) мають провідний рисунок на обох сторонах ізоляційної основи. Дозволяють збільшити щільність монтажу та надійність з'єднань, полегшують трасування провідників і оптимізують розміри плати завдяки щільному розміщенню елементів.

Багатошарові друковані плати (БДП) складаються з трьох або більше провідних шарів, розділених ізоляційними шарами. Вони використовуються при проектуванні складних пристроїв, які потребують дуже високої щільності монтажу компонентів. Виготовлення багатошарових плат складніше і потребує високої кваліфікації та спеціального обладнання [17].

Виходячи з даних характеристик різних друкованих плат, оптимальним рішенням для цієї розробки є використання двошарової друкованої плати, яка забезпечить необхідну гнучкість, функціональність і надійність.

Найпоширенішим матеріалом для друкованих плат є FR-4, який виготовляється з епоксидної смоли, армованої скловолокном. Для запропонованого комплексу, матеріал FR-4 буде найоптимальнішим

вибором, оскільки він забезпечує достатню міцність і стійкість до умов зовнішнього середовища, а також необхідні електричні характеристики для стабільної роботи електронних компонентів.

Серед доступних методів для виготовлення друкованих плат видокремлюють хімічний, електрохімічний та комбінований. Враховуючи характеристики проекту, вирішено скористатися комбінованим методом виготовлення. Цей метод є оптимальним для створення двосторонніх друкованих плат, оскільки він дозволяє отримувати чіткі лінії провідників та менше працезатратний у порівнянні з електрохімічним методом. Крім того, комбінований позитивний метод забезпечує вищу надійність друкованих плат, оскільки діелектрик знаходиться у сприятливих умовах, захищений фольгою від дії електроліту.

Проектування друкованої плати. Altium Designer – це програмне забезпечення, яке використовується для розробки електронних пристроїв та друкованих плат у промислових, наукових і інших галузях. На рисунках 2 і 3 показано 3D вигляд розробленої друкованої плати для запропонованого вимірювального комплексу.

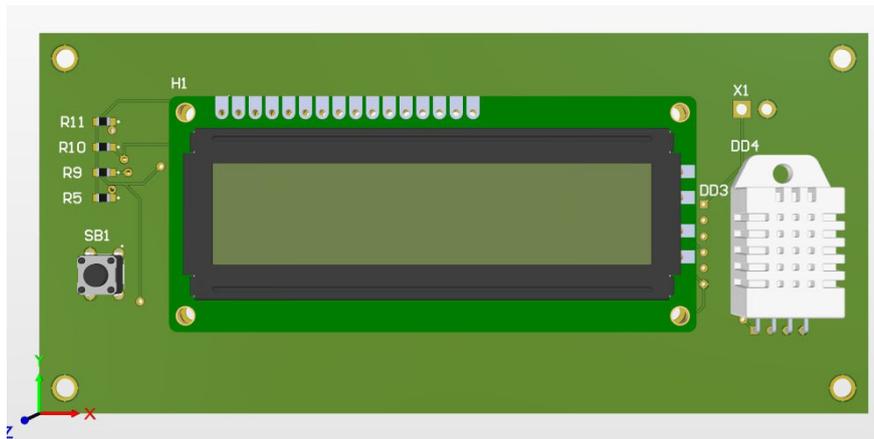


Рис. 2. 3D вигляд ДП зверху

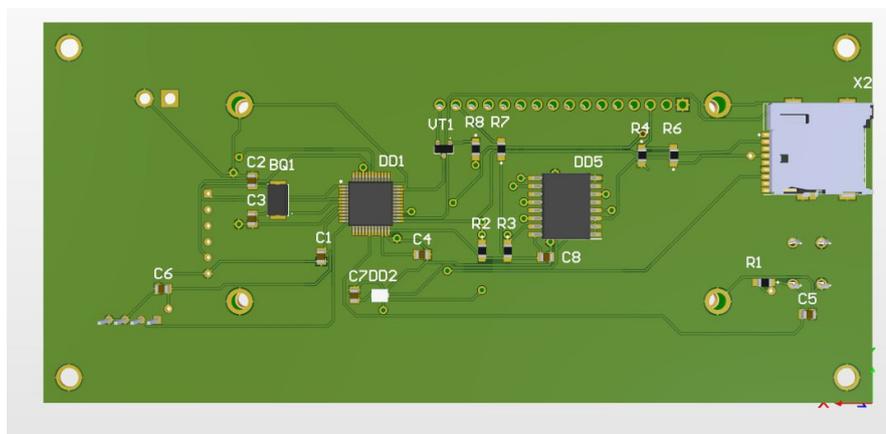


Рис. 3. 3D вигляд ДП знизу

Висновки. У роботі проведено аналіз наявних рішень, схемотехнічне проектування та проектування друкованого вузла для розробленого вимірювального комплексу стану атмосферного повітря. Детально розглянуто принцип роботи вимірювального комплексу стану атмосферного повітря на базі мікроконтролерів STM32, аналіз наявних рішень та вимоги до проектування вимірювального комплексу.

Досліджено принцип роботи вимірювальних комплексів на базі мікроконтролерів STM32. Розглянуто процеси збору даних з датчиків, їх обробки та відображення на LCD-екрані.

Розглянуто кілька сучасних метеостанцій, що використовують різні типи датчиків для моніторингу погодних умов. Це дозволяє порівняти технічні характеристики та функціональні можливості цих пристроїв. Аналіз визначає, які аспекти

дизайну і функціональності є найбільш важливими для проекту.

Розглянуто принципи функціонування вимірювальних комплексів стану атмосферного повітря. В результаті чого визначено вимоги для розробки запропонованого у даній роботі вимірювального комплексу.

Запропоновано структурну схему пристрою, яка визначає основні функціональні блоки та зв'язок між ними. Відповідно до неї розроблено принципову електричну схему. Описано вибір елементної бази, враховуючи їх технічні характеристики та відповідність вимогам даного проекту.

Проведено аналіз типів, матеріалів та методів виготовлення друкованих плат. Згідно з цим обрано двошарову друковану плату, виготовлену комбінованим позитивним методом з FR4. Для проектування використано САПР Altium Designer.

Список літератури:

1. D. Verma, S. Dhul, R. Saini, R.B. Dubey, IoT Based Air Pollution Monitoring System, International Journal of Innovative Research in Engineering & Management (IJIREM), Vol.5, 2018, pp 116-120. ISSN: 2350-0557
2. I. D. P. Hermida, Y. Wahyu, K. D. Permana, P. Kurniawan and H. Wijanto, Design ultra-wideband antenna 800–2400 MHz for cognitive radio applications, 2017 International Conference on Radar, Antenna, Microwave, Electronics, and Telecommunications (ICRAMET), Jakarta, Indonesia, 2017, pp. 158-163, doi: 10.1109/ICRAMET.2017.8253167.
3. J. Carbo, S. Mendoza, I. Endara and J. Urquizo, "Design and location analysis of fast charging hybrid vehicle stations. A case study from Ecuador," 2019 FISE-IEEE/CIGRE Conference – Living the energy Transition (FISE/CIGRE), Medellin, Colombia, 2019, pp. 1-8, doi: 10.1109/FISECIGRE48012.2019.8984976.
4. C. Zhao and Z. Hua, "Design of Motor Speed Control System Based on STM32 Microcontroller," 2022 International Conference on Computation, Big-Data and Engineering (ICBE), Yunlin, Taiwan, 2022, pp. 274-276, doi: 10.1109/ICBE56101.2022.9888225.
5. M. Stighezza et al., "Model-Based design of a Machine Learning algorithm for on-site food authenticity testing," 2024 IEEE International Workshop on Metrology for Industry 4.0 & IoT (MetroInd4.0 & IoT), Firenze, Italy, 2024, pp. 43-47, doi: 10.1109/MetroInd4.0IoT61288.2024.10584131.
6. J. M. Howerton and B. L. Schenck, "The Deployment of a LoRaWAN-Based IoT Air Quality Sensor Network for Public Good," 2020 Systems and Information Engineering Design Symposium (SIEDS), Charlottesville, VA, USA, 2020, pp. 1-6, doi: 10.1109/SIEDS49339.2020.9106676.
7. M. Janyasupab and J. Yongwiwat, "Low-Cost PM 2.5 Sensor and Cost-Effective Air Purification Study for Household Implementation," 2022 37th International Technical Conference on Circuits/Systems, Computers and Communications (ITC-CSCC), Phuket, Thailand, 2022, pp. 601-604, doi: 10.1109/ITC-CSCC55581.2022.9895085.
8. A. Onay, Y. Akin, A. Kafalı and E. Çıracı, "Real Time Air and Water Quality Monitoring based on Distributed Sensor Network," 2021 6th International Conference on Computer Science and Engineering (UBMK), Ankara, Turkey, 2021, pp. 118-123, doi: 10.1109/UBMK52708.2021.9558881.
9. P. K. Malik, A. S. Duggal, S. Aluvala, R. Sahithi, Geetanjali and A. Gehlot, "Development of a low-cost IoT device using ESP8266 and Atmega328 for real-time monitoring of Outdoor Air Quality with Alert," 2023 3rd International Conference on Advancement in Electronics & Communication Engineering (AECE), GHAZIABAD, India, 2023, pp. 125-129, doi: 10.1109/AECE59614.2023.10428098.
10. Kardashuk, V. S., and O. V. Davydenko. "Meteostantsiia na Arduino z vizualizatsiieiu i analizom danykh pohodnoi stantsii." (2018).
11. Datasheet STM32F103C8T6. URL: <https://www.st.com/en/microcontrollers-microprocessors/stm32f103c8.html>
12. Datasheet DHT22. URL: <https://www.mouser.com/datasheet/2/737/dht-932870.pdf>
13. Datasheet DPS310. URL: <https://www.alldatasheet.com/datasheet-pdf/pdf/876653/INFINEON/DPS310.html>
14. Datasheet PMS3003. URL: <https://dynamoelectronics.com/descargas/PMS3003.pdf>

15. Datasheet JHD162A. URL: <https://www.rhydolabz.com/documents/display/JHD162A.pdf>
16. Khandpur, Raghbir Singh. Printed circuit boards: Design, fabrication, assembly and testing. New York: McGraw-Hill, 2006.
17. Mitzner, K. Complete PCB design using orcad Capture and PCB editor. Amsterdam: Newnes/Elsevier, 2009.

Zylevich M.O., Zaichenko V.D. DEVELOPMENT OF AN ATMOSPHERIC AIR CONDITION MONITORING SYSTEM

This article examines the operating principles of an atmospheric air condition monitoring system based on STM32 microcontrollers, analyzes existing market solutions, and defines the requirements for designing such a system. The study investigates the functioning of monitoring systems utilizing STM32 microcontrollers, among the most popular solutions on the market due to their high performance, low power consumption, and ability to integrate with various sensors. The data collection processes from sensors, data processing, and display on an LCD screen are discussed.

The principles of operation and a comparative analysis of modern monitoring systems using different types of sensors for weather condition monitoring are examined. The technical characteristics and functional capabilities of these devices are compared, and the most important aspects of design and functionality for the modern market are identified. It is determined that the system should measure temperature, humidity, atmospheric pressure, and dust levels with high accuracy. Important elements include reliability, protection from adverse conditions, compactness, and energy efficiency. Special attention is given to the selection of sensors and protective features, including overload and overheating protection.

High-quality components are used in the development, such as the DPS310 sensor for pressure measurement, the DHT22 sensor for temperature and humidity, and the PMP3003 dust sensor for monitoring dust content in the air. Interaction with the display is carried out through the I2C interface. Data collection is managed by the STM32 microcontroller, which processes the sensor data and outputs it to the screen. The system is powered via a USB port, allowing easy connection of the weather station to a computer or another power source.

Due to the relatively low cost of components and ease of manufacture, this monitoring system can be used for prototyping and small-batch production in various industrial and scientific fields.

Key words: *monitoring system, microcontroller, printed circuit board, reliability, temperature-humidity sensor, barometer, laser dust sensor.*

Карпенко М.І.

Національний університет харчових технологій

Чумаченко С.М.

Апарат РНБО України

Мошенський А.О.

Національний університет харчових технологій

Гуйда О.Г.

Таврійський національний університет імені В.І. Вернадського

ВИБІР ОПТИМАЛЬНОЇ БАЗИ ДАНИХ ДЛЯ СТВОРЕННЯ ПРОГРАМНО-АПАРАТНОГО КОМПЛЕКСУ ВИЯВЛЕННЯ НЕБЕЗПЕЧНИХ РЕЧОВИН

Стаття присвячена дослідженню реляційних та нереляційних баз даних з метою визначення оптимального рішення для інтеграції в майбутній програмно-апаратний комплекс, призначений для виявлення небезпечних речовин. Мета дослідження полягає у виборі найкращої бази даних (БД) для створення програмно-апаратного комплексу виявлення небезпечних речовин. Для досягнення цієї мети було використано різні методи аналізу та синтезу: емпіричний, структурно-генетичний аналіз, контент-аналіз, експериментальна реалізація, зокрема, проведено літературний аналіз наукових публікацій для вивчення особливостей реляційних та нереляційних видів БД, а також виокремлення їх основних переваг та недоліків. Обрано вибірку БД для впровадження у проєкт: MySQL, PostgreSQL, MongoDB, Redis та InfluxDB. Виявлено найбільш оптимальні для проєкту БД: MySQL та MongoDB. Виявлені слабкі та сильні сторони кожної з БД. Для демонстрації практичної реалізації, було успішно здійснено підключення плати на базі ESP8266 до MySQL через API інтерфейсу сервісу «000webhost.com», демонструючи можливість інтеграції IoT-застосунків. В результаті було виявлено, що MySQL є найбільш оптимальним вибором для впровадження у даний комплекс. Такий висновок базується на декількох ключових аспектах, включаючи доступність MySQL завдяки ціновій політиці Oracle, його популярність у галузі, значну підтримку з боку спільноти та наявність документації, що полегшує вирішення потенційних проблем. Особливо важливим фактором у виборі MySQL стало його здатність ефективно функціонувати на малопотужних серверах, що є суттєвим для даного проєкту. Хоча MySQL поступається за швидкодією деяким іншим базам даних, його перевага полягає у здатності до оптимального управління розміром файлів баз даних, що забезпечує високий рівень продуктивності. Додатковою перевагою MySQL є його гнучкість та можливість інтеграції з додатковим обладнанням, зокрема з розширеною пам'яттю PSRAM, яка сприяє більш ефективному опитуванню датчиків і збалансованому обміну даними. Це дозволяє забезпечити надійне та ефективне зберігання даних, що є критичним для успішного розвитку проєкту в майбутньому. Таким чином, MySQL, у поєднанні з PSRAM, становить оптимальне рішення для реалізації програмно-апаратного комплексу, орієнтованого на виявлення небезпечних речовин. Отримані результати мають практичне значення для розробки застосунків, програмно-апаратних комплексів та програм, які мають взаємодіяти з БД. Дана робота може бути корисною для розробників та фахівців, які планують використовувати БД у своїх проєктах.

Ключові слова: MySQL, IoT, PSRAM, ESP8266, Arduino.

Постановка проблеми. У процесі розробки програмно-апаратного комплексу дистанційного зондування небезпечних речовин постала проблема вибору найбільш ефективної БД для зберігання даних сенсорів. Бажаним результатом, який вирішить цю проблему, має бути БД, яка б мала можливість отримувати дані з мікроконтролера

через мережу Інтернет, що дало б нові можливості для розвитку IoT. Основними обмеженнями є ціна, вимогливість до ресурсів та надійність.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Для досягнення цієї мети, було проведено детальний огляд періодичних наукових видань, які вийшли за останні 5 років. Використання БД у наш час

є широко розповсюдженим явищем. Про це свідчать робота «Wireless Biometric Fingerprint Attendance System Using Arduino and MySQL Database» Франсуа Секере та Віллі К. Офосу в 9 випуску Міжнародного журналу комп'ютерних наук, техніки та застосувань (IJCSSEA) [1] та розділ книги Чарльза Белла «MySQL and Arduino: United at Last!» [2]. Особливою популярністю платформа з відкритим кодом для програмування мікроконтролерів Arduino користується в Індії, про що свідчать статті Індонезійських журналу Jurnal Jaringan Telekomunikasi «Sistem pencatatan hasil timbangan menggunakan sensor load cell melalui database berbasis arduino uno» [3] та журналу ILCOM Jurnal Ilmiah «Realtime Database Sensor Menggunakan Arduino UNO Untuk Keperluan Sistem Informasi» [4], у якій йдеться про додавання БД до розумного дому. Найбільш значущим є дослідження «Performance evaluation of IoT data management using MongoDB versus MySQL databases in different cloud environments» [5], у якому порівнюються реляційні та нереляційні БД для досягнення максимальної ефективності по параметрам швидкодії та використання пам'яті.

Постановка завдання. Метою статті є проаналізувати реляційні та нереляційні БД. Обрати найбільш ефективну БД згідно критеріїв: вимогливість до ресурсів, ціна, надійність.

Виклад основного матеріалу дослідження. Бази даних (БД) у порівнянні з іншими рішеннями (Google Sheets, сховищами даних або прямим зберіганням на IoT пристроях) мають ряд переваг:

- Структуроване зберігання: Бази даних надають структурований підхід до зберігання даних, де ви можете визначити таблиці, стовпці та відношення між даними. Це дозволяє організувати дані в логічній формі і спрощує доступ до них.

- Ефективний пошук і фільтрація: Бази даних надають механізми для швидкого пошуку та фільтрації даних за різними критеріями. Ви можете використовувати запити для витягування потрібної інформації з бази даних без необхідності проглядати всі дані вручну.

- Система безпеки: Бази даних дозволяють встановлювати рівні доступу та права на різні дані. Ви можете контролювати, хто має право переглядати, змінювати або видаляти дані з бази.

- Масштабованість: Бази даних дозволяють масштабувати обсяги даних і робити ефективні операції з великими наборами даних. Ви можете додавати нові записи, розширювати схему бази даних і обробляти великі обсяги даних без втрати продуктивності.

- Консистентність даних: Бази даних надають механізми для забезпечення цілісності даних, що означає, що дані залишаються узгодженими та правильними навіть при одночасному доступі декількох користувачів або процесів.

Підключення Esp8266 та Esp32 можна легко реалізувати з наступними БД з відкритим кодом: MySQL, PostgreSQL, MongoDB, Redis та InfluxDB. Ці бази даних підтримують протоколи комунікації (наприклад, HTTP або MQTT), що дозволяють взаємодіяти з мікроконтролером.

Усі з перелічених СУБД мають право на реалізацію у проекті. Основна різниця між ними полягає в їх ліцензіях, планах підтримки та особливостях. Кожна з них може задовольнити потребу у збереженні та обробці даних з датчиків і до кожної існують способи підключення мікроконтролерів. Враховуючи такі фактори як попередній досвід розробки автора, популярність БД та доступність навчальних матеріалів та посібників, варто розглянути детальніше та порівняти MySQL та MongoDB.

MySQL – це одна з найпопулярніших реляційних баз даних, СУБД, розроблена для зберігання та управління великим обсягом даних, базується на мові структурованого запиту (SQL) і надає широкі можливості для організації та маніпулювання даними [5].

У MySQL існують різні типи таблиць (по суті движків БД), які можна використовувати в залежності від потреб проекту. Кожен тип таблиці визначає, як саме дані будуть зберігатися і опрацьовуватися в базі даних. Кожен тип має свої особливості і підходить для різних сценаріїв використання. Основні типи таблиць в MySQL включають: MyISAM, InnoDB, MariaDB, MEMORY, CSV, NDB (MySQL Cluster), тощо.

Однією з найбільш популярних є MariaDB завдяки більш високій продуктивності; можливості відновлення стану з будь-якої точки в журналі операцій, включаючи підтримку CREATE/DROP/RENAME/TRUNCATE; відкату результатів виконання поточної операції у разі переривання та підтримці всіх форматів стовпців MyISAM.

Серед переваг MySQL можна виділити наступні:

- Надійність та стабільність: MySQL забезпечує обробку великої кількості транзакцій і забезпечує цілісність даних навіть при великому навантаженні.

- Швидкодія обробки запитів та доступу до даних. СУБД оптимізована для роботи з великими обсягами даних і може працювати ефективно навіть на серверах з обмеженими ресурсами.

Порівняння БД

| Характеристика | MySQL | PostgreSQL | MongoDB | Redis | InfluxDB |
|---|--|--------------------------------------|---|--------------------------------------|---|
| Тип бази даних | Реляційна | Реляційна | Документ-орієнтована | Ключ-значення | Часовий ряд |
| Мова запитів | SQL | SQL | JSON-подібна мова запитів | Команди Redis | InfluxQL |
| Структура даних | Структурована | Структурована | Неструктурована | Неструктурована | Неструктурована |
| Підтримка транзакцій | Так | Так | Ні | Ні | Так |
| Підтримка реплікації | Так | Так | Так | Так | Так |
| Масштабованість | Горизонтальна та вертикальна | Горизонтальна та вертикальна | Горизонтальна | Горизонтальна та вертикальна | Горизонтальна та вертикальна |
| Швидкодія | Швидка для багатьох сценаріїв | Швидка та оптимізована | Швидка для запису, повільна для читання | Дуже швидка для простих операцій | Швидка для часових рядів |
| Складність встановлення та налаштування | Середня | Висока | Середня | Низька | Середня |
| Спільнота та підтримка | Велика спільнота та активна розробка | Велика спільнота та активна розробка | Велика спільнота та активна розробка | Велика спільнота та активна розробка | Середня спільнота та активна розробка |
| Безпека | Середня | Висока | Вище середнього | Середня | Середня |
| Відкритість коду | Так | Так | Так | Так | Так |
| Вимоги до ресурсів | Середні (працює навіть на малопотужних серверах) | Вище середніх | Середні | Вимагає обмежену кількість пам'яті | Потребує великої кількості пам'яті та процесорної потужності для оптимальної роботи з великими обсягами часових рядів даних |

– Легкість освоєння: MySQL має простий та зрозумілий синтаксис SQL, що полегшує розробку та обслуговування бази даних. Окрім того, дана СУБД має велику спільноту користувачів, що забезпечує доступ до документації та підтримки.

– Доступні розширення: MySQL підтримує розширення за допомогою різних движків баз даних, які можуть бути використані для специфічних потреб проекту.

Серед недоліків MySQL можна виділити наступні:

– Масштабованість: MySQL може мати обмеження щодо масштабування при обробці дуже великого обсягу даних або при високому навантаженні. Для роботи з дуже великими базами даних може знадобитись додаткове налаштування та оптимізація.

– Відсутність певних функцій, які присутні в деяких інших СУБД. Наприклад, підтримка повнотекстового пошуку, геопросторових запитів або аналітичних функцій може бути обмеженою в стандартній конфігурації MySQL.

– Управління схемою бази даних в MySQL може бути трохи складнішим порівняно з деякими іншими реляційними СУБД. Додавання, зміна

або видалення структури таблиць може вимагати додаткових зусиль та уваги до деталей.

– Відсутність вбудованої підтримки JSON: підтримка роботи з JSON-даними в MySQL була впроваджена пізніше, починаючи з версії 5.7. Якщо вам потрібно широко використовувати JSON-структури в базі даних, можуть бути кращі альтернативи, що мають більш розширену підтримку JSON.

– Безпека: функції безпеки MySQL не такі надійні, як в інших системах, що робить її вразливою до атак, якщо її не захищено належним чином.

Проте, дані проблеми легко вирішуються за допомогою встановлення необхідного ПЗ:

Для роботи з дуже великими базами даних або при високому навантаженні можна використовувати розподілені системи баз даних, такі як MySQL Cluster або MySQL InnoDB Cluster.

Для розширення функціональності MySQL можна використовувати розширення та плагіни. Наприклад, для повнотекстового пошуку можна встановити розширення MySQL Full-Text Search, а для аналітичних операцій – плагін MySQL Enterprise Edition, який надає розширені аналітичні функції.

Щоб спростити управління схемою бази даних, можна використовувати інструменти для моделювання даних, такі як MySQL Workbench. Вони дозволяють зручно додавати, змінювати або видаляти таблиці та структуру бази даних.

За браком вбудованої підтримки JSON в MySQL можна використовувати додаткові розширення, такі як MySQL JSON Data Type або MySQL JSON Functions. Вони додають підтримку роботи з JSON-даними, що дозволяє зручно працювати з цим форматом.

MongoDB – популярна документно-орієнтована база даних NoSQL, яка рекомендована під час розробки веб-додатків, які масштабуються та потребують великої бази даних для зберігання величезної кількості саме неструктурованих даних. MongoDB зберігає дані як документи у двійковому представленні, які називаються об'єктами BSON (Binary JSON), які є об'єктами, подібними до JSON у двійковому кодуванні. Пов'язана інформація зберігається разом для швидкого доступу до запитів через мову запитів MongoDB. Документи в MongoDB можна організувати в «колекції». Поля можуть відрізнятися від документа до документа; немає необхідності оголошувати системі структуру документів – документи описуються самі. Якщо до документа потрібно додати нове поле, це поле можна створити, не впливаючи на всі інші документи в колекції, не оновлюючи центральний системний каталог і не переводячи систему в автономний режим [5].

Переваги MongoDB:

– Масштабованість: MongoDB має високу масштабованість (горизонтально шляхом розподілу даних на кілька серверів (шардів)), що робить її придатною для програм із вимогами, що швидко змінюються, і великими наборами даних.

– Гнучкість: документоорієнтована модель даних MongoDB дозволяє розробникам зберігати та отримувати доступ до даних у більш гнучкий та інтуїтивно зрозумілий спосіб, ніж традиційні реляційні бази даних. Дана СУБД підтримує механізми реплікації, що дозволяють створювати резервні копії даних та забезпечувати високу доступність системи.

– Простота використання: MongoDB легко налаштувати та використовувати, завдяки простому та інтуїтивно зрозумілому інтерфейсу.

– Продуктивність: MongoDB відома своїми високопродуктивними можливостями з високою швидкістю читання та запису.

Недоліки MongoDB:

– Проблема узгодженості: гнучка модель даних MongoDB може ускладнити підтримку

узгодженості даних у різних документах і колекціях.

– Відсутність транзакцій: MongoDB не підтримує багатодокументні транзакції, що може бути недоліком для програм, які вимагають складних транзакцій.

– Використання пам'яті: використання пам'яті MongoDB може бути високим у порівнянні з іншими системами баз даних, особливо при роботі з великими наборами даних.

– Обмежена підтримка з'єднань: MongoDB не підтримує традиційні з'єднання у стилі SQL, що може ускладнити виконання певних типів запитів.

Згідно досліджень, збільшення робочого навантаження базується на збільшенні кількості підключених датчиків на станцію з 1 до 12 датчиків і, отже, збільшення кількості операцій вставки. MySQL приймає від 4000 записів при першій операції вставки до 48000 записів в останніх операціях вставки. З іншого боку, MongoDB приймає 4000 записів у всіх випадках від першої до останньої операції. У такому випадку найбільша затримка за умови 12 сенсорів та 48000 записів буде сягати у MySQL 72000 мілісекунд, а у MongoDB при такій же кількості сенсорів та 4000 записів буде сягати 1623 мілісекунд [5].

MySQL виявився більш продуктивним при вставці невеликої кількості записів та під час закінчення кожного періоду стабільності (поетапне збільшення кількості датчиків від 1 до 12). Зі збільшенням кількості вставлених записів і в кінці кожного періоду стабільності (від сценарію з 6 до 7 та від 11 до 12 датчиків), MySQL перевершує MongoDB. Однак, результати показали, що збільшення робочого навантаження у разі використання MySQL призводить до значної втрати продуктивності, більшої, ніж у випадку використання MongoDB. Тим не менш, MySQL випереджає MongoDB по розміру файлу БД: 2500 КБ проти 6340 КБ при 48 тисячах записів.

Інформація щодо розміру файлу БД може бути корисною в задачах, коли необхідно використовувати мікроконтролер для операцій з БД. ESP32 має кілька сотень кілобайт внутрішньої оперативної пам'яті, розташованої на тому ж кристалі, що й інші компоненти чіпа. Для деяких цілей цього може бути недостатньо, тому ESP32 має можливість використовувати до 4 МБ віртуальних адрес для зовнішньої пам'яті PSRAM (псевдостатична RAM). RAM – це «швидка» оперативна пам'ять, а PSRAM повільніша, проте коли необхідно збирати дані з сенсорів у межах об'єкта досліджень, наприклад, поля, цього буде цілком достатньо.

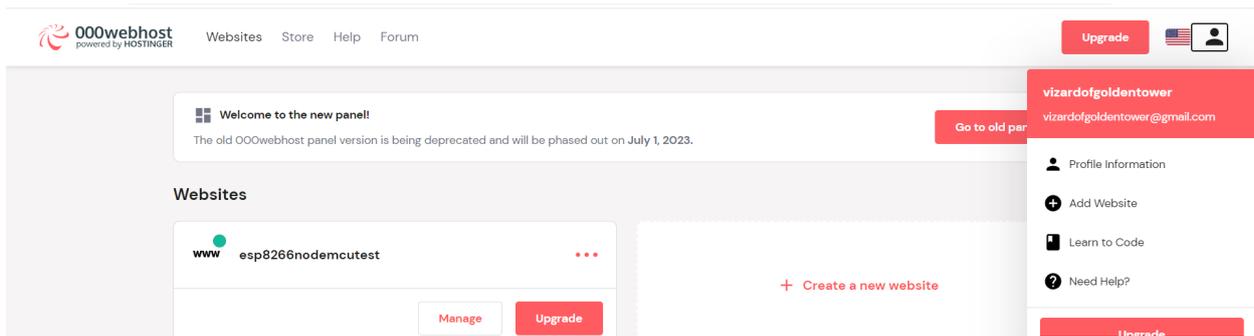


Рис. 1. Налаштований сервер

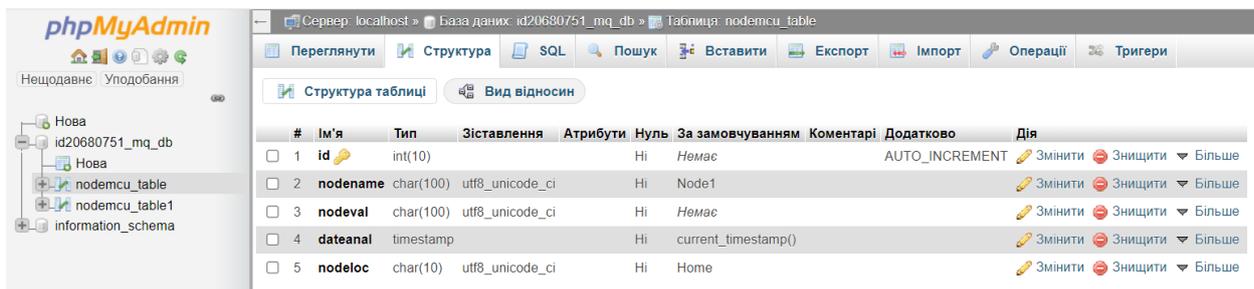


Рис. 2. Таблиці БД

Для реалізації підключення Esp8266 до MySQL було обрано наступний варіант ESP8266 → API сервер → MySQL. Плата ESP давала запит серверу на внесення даних, сервер перевіряв дозволи дані заносились до БД.

Для безпечної роботи необхідно було забезпечити плату достатнім рівнем шифрування і надсилати інформацію безпосередньо в БД або використовувати API сервер. У даному випадку був налаштований API сервер за допомогою PHP за адресою 000webhost.com.

Наступним кроком було створення БД та налаштування таблиць. Навіть без підключеного датчика інформація про пристрій стабільно надсилалась, що ви можете побачити на рисунках 3, 4 та 5. Для відображення інформації з БД на веб-сторінці був застосований спеціальний PHP скрипт.



Рис. 3. Інформація з СОМ порту про успішну відправку даних

Висновки. Проведений аналіз реляційних та нереляційних баз даних у ході даного дослідження підкреслив важливі аспекти, які впливають на ефективне функціонування баз даних. Результати дослідження виявили, що серед розглянутих варіантів, MySQL виступає як оптимальний вибір для впровадження у розглянутий програмно-апаратний комплекс. MySQL виступає як ідеальний варіант за рахунок цінової політики Oracle, яка робить дану БД доступною та популярною в індустрії, яка забезпечує велику підтримку спільноти та наявність документації, що сприяє швидкому розв'язанню можливих проблем. Важливим фактором вибору MySQL є його здатність працювати на малопродуктивних серверах. Безпосередньо для нашого проекту MySQL компенсує відставання в швидкодії ефективністю управління розміром файлу БД, що дозволяє забезпечити високий ступінь оптимізації та продуктивності відносно інших варіантів. Однією з ключових переваг використання MySQL є його гнучкість та здатність до інтеграції з додатковим обладнанням. Встановлення розширеної пам'яті PSRAM відкриває шлях до більш ефективного опитування датчиків, забезпечуючи більш збалансований та продуктивний обмін даними у рамках розглянутого комплексу. Отже, обґрунтовано, що MySQL становить оптимальний вибір для впровадження у проект програмно-апаратного

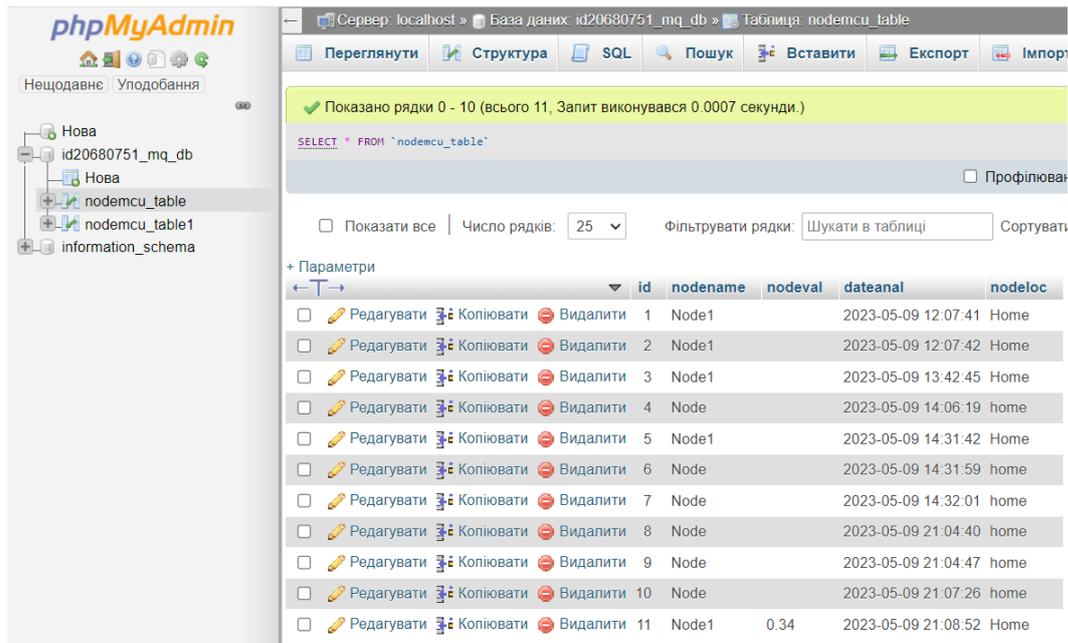


Рис. 4. Відображення інформації в MySQL

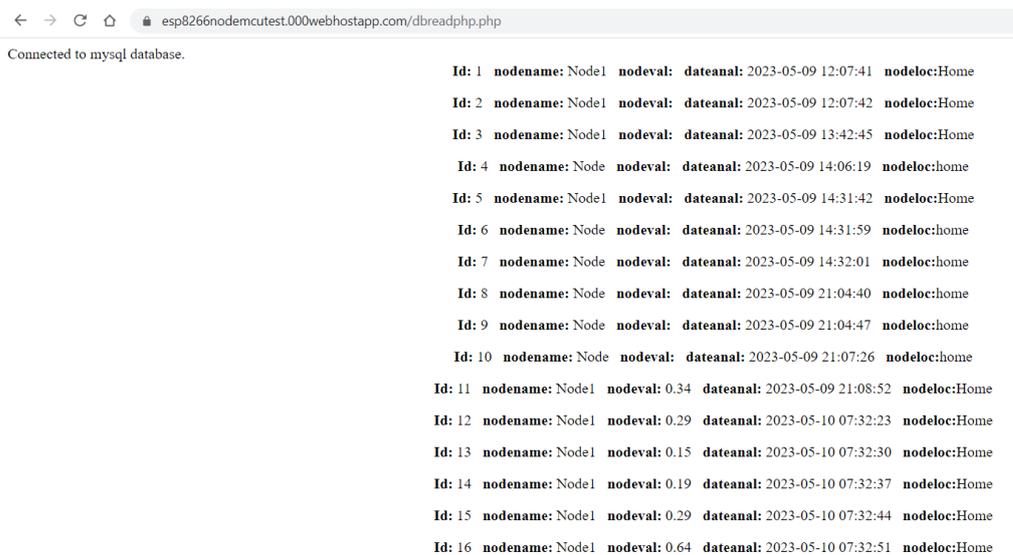


Рис. 5. Відображення інформації на сторінці

комплексу для виявлення небезпечних речовин. Його реалізація разом із розширеною пам'яттю PSRAM протягом дослідженого контексту може

дозволити досягти ефективного та надійного зберігання даних, забезпечуючи гармонійний розвиток проекту в майбутньому.

Список літератури:

1. Asabere, P., Sekyere, F., & Ofosu, W. K. (2020). Wireless biometric fingerprint attendance system using Arduino and MySQL database. *International Journal of Computer Science, Engineering and Applications (IJCSSEA)* Vol. 9.
2. Bell, C., & Bell, C. (2020). MySQL and Arduino: United at Last!. *Beginning Sensor Networks with XBee, Raspberry Pi, and Arduino: Sensing the World with Python and MicroPython*, 475-555.
3. Widagdo, D. Y. (2020). Sistem pencatatan hasil timbangan menggunakan sensor load cell melalui database berbasis arduino uno. *Journal of Telecommunication Network (Jurnal Jaringan Telekomunikasi)*, 10(1), 13-19.

4. Akbar, M. (2017). Realtime Database Sensor Menggunakan Arduino UNO Untuk Keperluan Sistem Informasi. *ILKOM Jurnal Ilmiah*, 9(1), 91-95.
5. Eyada, M. M., Saber, W., El Genidy, M. M., & Amer, F. (2020). Performance evaluation of IoT data management using MongoDB versus MySQL databases in different cloud environments. *IEEE access*, 8, 110656-110668.
6. Fernández De Villalta Canals, E. (2022). Data transmission via wifi and mobile data to a database using Arduino (Bachelor's thesis, Universitat Politècnica de Catalunya).
7. Elumalai, G., & Ramakrishnan, R. (2020). A novel approach to monitor and maintain database about physiological parameters of (Javelin) athletes using Internet of Things (IoT). *Wireless Personal Communications*, 111(1), 343-355.
8. Abdulkadhim, E. G. (2021, February). Design and develop an attendance system based on fingerprint and arduino board. In *Journal of Physics: Conference Series* (Vol. 1804, No. 1, p. 012011). IOP Publishing.
9. Ismail, N. S. N., Mustafa, S. Z. B., Yunus, F., & Abd Warif, N. B. (2020, June). Internet of Things (IoT) Smart Rubber Scale (SRS) System Using Arduino Platform. In *2020 IEEE International Conference on Automatic Control and Intelligent Systems (I2CACIS)* (pp. 45-50). IEEE.
10. Arunachalam, A., & Andreasson, H. (2022). RaspberryPi-Arduino (RPA) powered smart mirrored and reconfigurable IoT facility for plant science research. *Internet Technology Letters*, 5(1), e272.
11. Li, C., & Gu, J. (2019). An integration approach of hybrid databases based on SQL in cloud computing environment. *Software: Practice and Experience*, 49(3), 401-422.

Karpenko M.I., Chumachenko S.M., Moshenskyi A.O., Guida O.G. CHOOSING THE OPTIMAL DATABASE FOR CREATING A SOFTWARE AND HARDWARE COMPLEX FOR THE DETECTION OF DANGEROUS SUBSTANCES

The article is devoted to the study of relational and non-relational databases in order to determine the optimal solution for integration into the future hardware and software complex designed for the detection of hazardous substances. The purpose of the study is to choose the best database (DB) for creating a hardware and software complex for detecting dangerous substances. To achieve this goal, various methods of analysis and synthesis were used: empirical, structural and genetic analysis, content analysis, experimental implementation, in particular, a literary analysis of scientific publications was conducted to study the features of relational and non-relational types of databases, as well as to highlight their main advantages and disadvantages. A selection of databases was selected for implementation in the project: MySQL, PostgreSQL, MongoDB, Redis and InfluxDB. The most optimal databases for the project were identified: MySQL and MongoDB. Weaknesses and strengths of each database have been identified. To demonstrate practical implementation, the ESP8266-based board was successfully connected to MySQL through the API interface of the "000webhost.com" service, demonstrating the possibility of integrating IoT applications. As a result, it was found that MySQL is the most optimal choice for implementation in this complex. This conclusion is based on several key aspects, including the affordability of MySQL thanks to Oracle's pricing policy, its popularity in the industry, significant support from the community, and the availability of documentation that facilitates the resolution of potential problems. A particularly important factor in the choice of MySQL was its ability to function effectively on low-power servers, which is essential for this project. Although MySQL is inferior to some other databases in terms of performance, its advantage lies in the ability to optimally manage the size of database files, which ensures a high level of performance. An additional advantage of MySQL is its flexibility and the ability to integrate with additional hardware, in particular with extended PSRAM memory, which facilitates more efficient polling of sensors and balanced data exchange. This allows for reliable and efficient data storage, which is critical for the successful development of the project in the future. Thus, MySQL, in combination with PSRAM, is the optimal solution for the implementation of a software-hardware complex focused on the detection of dangerous substances. The obtained results are of practical importance for the development of applications, hardware and software complexes, and programs that must interact with the database. This work can be useful for developers and specialists who plan to use the database in their projects.

Key words: MySQL, IoT, PSRAM, ESP8266, Arduino.

Кириченко О.Л.

Чернівецький національний університет імені Юрія Федьковича

Кириченко О.О.

Чернівецький національний університет імені Юрія Федьковича

ВИКОРИСТАННЯ AWS APPSYNC ДЛЯ КОМУНІКАЦІЇ ВЕБДОДАТКІВ У РЕАЛЬНОМУ ЧАСІ

У статті детально проаналізовано можливість використання хмарної технології Amazon Web Services (AWS) AppSync для організації ефективної, надійної та масштабованої комунікації між різними вебдодатками в реальному часі. Розглянуто особливості моделі безсерверних обчислень з точки зору ефективного використання обчислювальних ресурсів та економічної вигоди порівняно з утриманням та налаштуванням постійної серверної інфраструктури. Проведено порівняльний аналіз рішень для реалізації комунікації в реальному часі між сервісами на прикладі AWS AppSync та WebSockets через API Gateway. Розроблено приклади додатків з використанням зазначених технологій. Здійснено вимірювання швидкодії створених вебсервісів з використанням різних підходів до реалізації отримування інформації в реальному часі за допомогою навантажувального тестування. Тестування здійснювалося відповідно до декількох тестових сценаріїв, які емулюють поведінку вебдодатків під час здійснення комунікації в реальному часі. Аналіз результатів тестування дозволяє зробити висновок про оптимальність вибору технології AWS AppSync для розв'язання поставленої задачі. Під час тестування були виявлені та зафіксовані певні обмеження щодо застосування AWS AppSync, такі як використання GraphQL, кількість запитів та підключень, зниження продуктивності при передачі великої кількості даних, а також проаналізовано вартість використання відповідного хмарного сервісу, яка залежить від кількості запитів, з'єднань та передачі даних, що може бути більш вигідним для складних запитів та інтерактивних додатків. Сформульовано основні критерії для вибору AWS AppSync при розробці хмарного додатка для реалізації комунікації в реальному часі, такі як масштабування, інтеграція з іншими сервісами, вбудована підтримка механізмів автентифікації й авторизації. Зроблено висновок стосовно остаточного вибору між AWS AppSync та API Gateway WebSocket, що залежить від особливостей вимог та архітектури додатка для отримування інформації в реальному часі, таких як складність запитів, вимоги до масштабованості, вартість та рівень необхідної інтеграції з іншими сервісами.

Ключові слова: хмарні обчислення, аналітичні дослідження, хмара, хмарні технології, безсерверна архітектура, AWS (Amazon Web Services), тестування під навантаженням, вебдодаток, вебсервіс.

Постановка проблеми. У сучасному світі, де передача даних у реальному часі є критично важливою для багатьох вебдодатків, необхідність у швидких та ефективних засобах комунікації стає все більш актуальною. Вебдодатки, які забезпечують оновлення в реальному часі, такі як чати, інформаційні панелі, та сервіси для спільної роботи, вимагають стабільного та надійного способу передачі даних. Одним із таких рішень є використання AWS AppSync.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Хмарні обчислення є дуже популярними завдяки численним перевагам, які вони надають. Зниження витрат на інфраструктуру та обслуговування, гнучке збільшення або зменшення ресурсів відповідно до потреб, висока доступність та відновлення після збоїв, оптимізація роботи та ефективність використання ресурсів, високий рівень

захисту даних та інформаційна безпека – це деякі з переваг хмарних обчислень, які приваблюють бізнес [1].

Подібно до хмарних технологій, real-time communication (RTC) є ще однією важливою сферою, яку досліджують компанії для свого зростання. RTC дозволяє миттєво обмінюватися інформацією, що значно скорочує час прийняття рішень і підвищує продуктивність. Завдяки цьому компанії можуть оперативніше вирішувати проблеми, що виникають, і ефективно співпрацювати. Це особливо важливо для служб підтримки клієнтів, де швидке реагування на запити клієнтів покращує рівень задоволеності користувачів. Реалізація RTC у вебдодатках дозволяє компаніям легко масштабувати свої сервіси, відповідаючи на зростаючі потреби бізнесу. Наприклад, в е-комерції реальний час допомагає миттєво оновлювати

інформацію про доступність товарів, що зменшує ризик подвійних продажів і покращує управління запасами. Таким чином, real-time communication у вебдодатках не тільки підвищує продуктивність і покращує користувацький досвід, але й надає гнучкі рішення для підтримки бізнес-процесів у різних умовах. Це робить RTC ключовим елементом сучасних вебдодатків і бізнес-рішень [2].

Окремим напрямком у хмарних технологіях є безсерверні обчислення (serverless computing) – модель хмарних обчислень, для яких платформа динамічно керує виділенням машинних ресурсів [3]. Використання безсерверної архітектури для реалізації комунікацій у реальному часі надає значні переваги, що робить її привабливим варіантом для сучасних вебдодатків. Так, використання таких сервісів, як AWS Lambda та API Gateway, дозволяє додаткам автоматично масштабуватися у відповідь на попит. Це означає, що під час пікових навантажень автоматично додаються необхідні ресурси, що забезпечує стабільну роботу та позитивний користувацький досвід. Така масштабованість є критично важливою для додатків, що потребують оновлень у реальному часі, де попит користувачів може значно коливатися [4].

Безсерверні платформи зазвичай працюють за моделлю «оплата за фактичне використання», стягуючи плату лише за реальний час роботи та використані ресурси. Ця модель є більш економічно вигідною порівняно з утриманням та налаштуванням постійної серверної інфраструктури, яка часто може бути недовантаженою. Переваги вартісної ефективності особливо відчутні для додатків із нерівномірними навантаженнями [5].

Безсерверні архітектури, у поєднанні з сервісами, такими як AWS AppSync або WebSockets через API Gateway, забезпечують канали комунікації з низькою затримкою. Ці сервіси гарантують, що оновлення надходять до користувачів у реальному часі, підвищуючи швидкість реагування та інтерактивність додатків. Затримка мінімізується завдяки використанню глобально розподіленої інфраструктури та граничних локацій [6].

Постановка завдання. Метою дослідження є можливість та ефективність використання AppSync для забезпечення надійної та масштабованої комунікації між різними вебдодатками у хмарному середовищі.

Об'єкт дослідження: процеси та механізми комунікації між вебдодатками у розподілених системах.

Предмет дослідження: використання технології AppSync для організації комунікації між при-

строями, включаючи архітектурні особливості, методи синхронізації даних та забезпечення безперервного обміну інформацією.

Виклад основного матеріалу дослідження. У даній статті проведено порівняльний аналіз рішень для реалізації комунікації в реальному часі між сервісами на прикладі AWS AppSync та WebSockets через API Gateway.

Розглянемо простий вебсервіс, який є частиною системи для масової генерації pdf документів з результатами сесії для кожного студента (рис. 1). Цей сервіс дозволяє в реальному часі отримувати інформацію стосовно статусу чергової генерації.

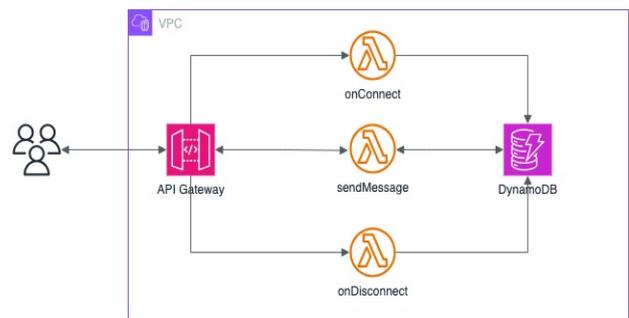


Рис. 1. Архітектура вебсервісу для отримання інформації в реальному часі

Архітектура сервісу використовує Amazon API Gateway, AWS Lambda, Amazon DynamoDB, де Amazon API Gateway – це повністю керований сервіс для розробників, який спрощує публікацію, обслуговування, моніторинг, захист та використання API у будь-яких масштабах [7], Amazon DynamoDB – це повністю керована безсерверна база даних NoSQL на основі пар «ключ-значення», яка створена для запуску високопродуктивних програм у будь-якому масштабі [8].

На основі API Gateway можна створити WebSocket API зі збереженням стану з'єднання в DynamoDB. Такий підхід дозволить WebSocket API викликати інші сервіси на основі вмісту повідомлень, які надходять від клієнтів. На відміну від REST API, який отримує запити та відповідає на них, WebSocket API забезпечує двосторонній зв'язок між клієнтськими додатками та серверною частиною. Це означає, що сервер може надсилати повідомлення безпосередньо підключеним клієнтам [9].

WebSocket API складається з одного або кількох маршрутів. Вибір маршруту здійснюється на основі повідомлень, які повинні містити властивість “action”. За замовчуванням є три маршрути, які вже визначені в WebSocket API – \$connect, \$disconnect і \$default. Архітектура розробленого сервісу передбачає створення спеціального марш-

фуну – sendMessage. Таким чином, маршрути виконують наступні завдання:

\$connect – під час виклику даного маршруту функція Lambda (onConnect) додасть ідентифікатор підключення до DynamoDB.

\$disconnect – під час виклику даного маршруту функція Lambda (onDisconnect) видалить ідентифікатор з'єднання з DynamoDB.

sendMessage – під час виклику даного маршруту тіло повідомлення буде надіслано на всі підключені сервіси.

Схема взаємодії стороннього сервісу з нашим додатком буде складатися з наступних кроків (рис. 2):

- спочатку клієнти встановлюють WebSocket з'єднання за допомогою API GateWay;
- клієнт підписується на деякі теми, надсилаючи повідомлення через WebSocket (подія \$connect);
- запускається відповідна Lambda функція на маршруті \$connect і створює підписку: ідентифікатор підключення WebSocket клієнта та тему, на яку він хоче підписатися;
- потім клієнт робить запит, який містить інформацію для інших клієнтів;
- цей запит обробляється Lambda функцією на маршруті sendMessage, формується повідомлення та надсилається клієнтам, підписаним на вказану в запиті тему через відповідні веб-сокети;
- клієнти отримують повідомлення та оновлюються.

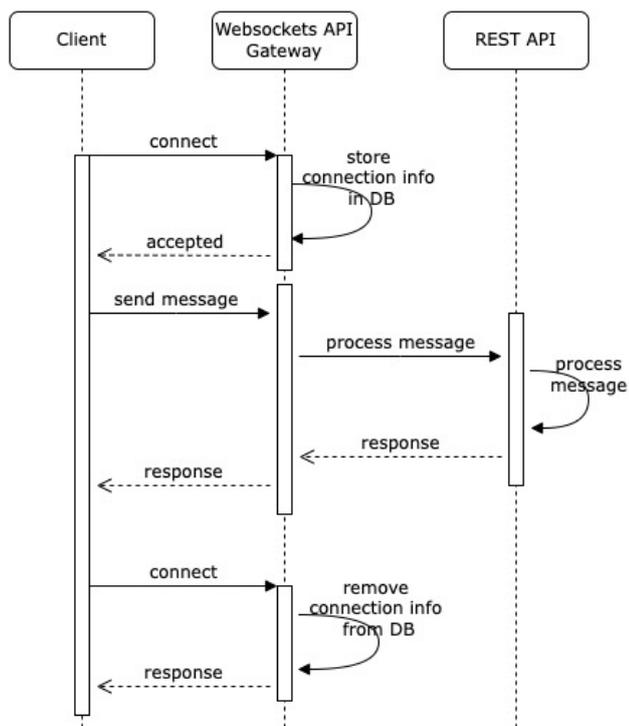


Рис. 2. Схема взаємодії клієнта з WebSocket API

Іншим підходом для реалізації комунікації в реальному часі з застосуванням безсерверних технологій є використання AWS AppSync.

AWS AppSync – це безсерверний GraphQL сервіс для мобільних, веб та корпоративних додатків.

AWS AppSync дозволяє розробникам підключати свої програми та служби до даних і подій за допомогою безпечних, безсерверних і високопродуктивних API GraphQL і Pub/Sub [10].

AWS AppSync використовує переваги підписки GraphQL для виконання операцій у реальному часі, надаючи дані клієнтам, які вирішують прослуховувати певні події з серверної частини. Це означає, що можна без особливих зусиль створити будь-яке підтримуване джерело даних у режимі реального часу в AWS AppSync, а керування з'єднанням автоматично оброблятиметься клієнтом AWS AppSync, використовуючи WebSocket як мережевий протокол між клієнтом і сервісом (рис. 3).



Рис. 3. Підписки на GraphQL у реальному часі в AppSync

Архітектура нашого сервісу із застосуванням AppSync відображена на рис. 4.

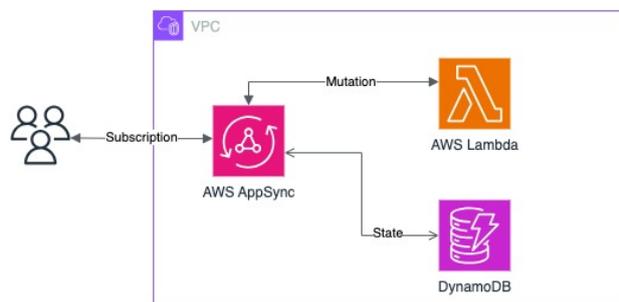


Рис. 4. Архітектура вебсервісу для отримання інформації в реальному часі з застосуванням AppSync

Клієнти вебсервісу підписані на певну мутацію GraphQL, яка змінює стан генерації pdf документів у DynamoDB. Усі вони отримують інформацію, пов'язану з станом поточної генерації, одночасно. Це гарантує своєчасне отримання повідомлення

про успішне завершення генерації або про виникнення будь-яких помилок (рис. 5).

Варто зазначити, що AWS AppSync GraphQL захищено авторизацією IAM на сервері. Для надання доступу кінцевим користувачам використовується пул ідентифікаційних даних Amazon Cognito. AWS Lambda, яка відповідає за обробку бізнес даних, також використовує IAM роль для доступу до AppSync, що дозволяє уникнути несанкціонованого доступу до даних.

Для вимірювання швидкодії нашого вебсервісу з використанням різних підходів до реалізації отримання інформації в реальному часі ми розгорнули 2 різних варіанти додатку та підготували тестові сценарії.

Для реалізації тестів використовувався Locust, який є ефективним інструментом для навантажувального тестування систем з обміном даних у режимі реального часу завдяки своїй масштабованості, підтримці WebSocket, простоті написання сценаріїв та можливостям моніторингу і аналізу [11].

Результати тестування під навантаженням вебсервісу наведені в таблиці 1.

Порівняльний аналіз результатів тестування свідчить про те, що AWS AppSync є конкурентною опцією для побудови систем з комунікацією у реальному часі в хмарному середовищі. Як і інші опції AppSync має певні обмеження у застосуванні. Так, GraphQL запити можуть бути складними для написання та оптимізації. AWS AppSync має обмеження на кількість запитів та підключень, призводить до зменшення кількості активних WebSocket-з'єднань. Також запити, що вимагають значного часу обробки або залучають велику кількість даних, можуть знижувати продуктивність.

З іншого боку, AWS AppSync пропонує вбудовану інтеграцію з іншими сервісами AWS (DynamoDB, Lambda, Cognito), що спрощує налаштування та управління, автоматично масштабується для обробки великої кількості запитів та підключень, зберігаючи високу продуктивність.

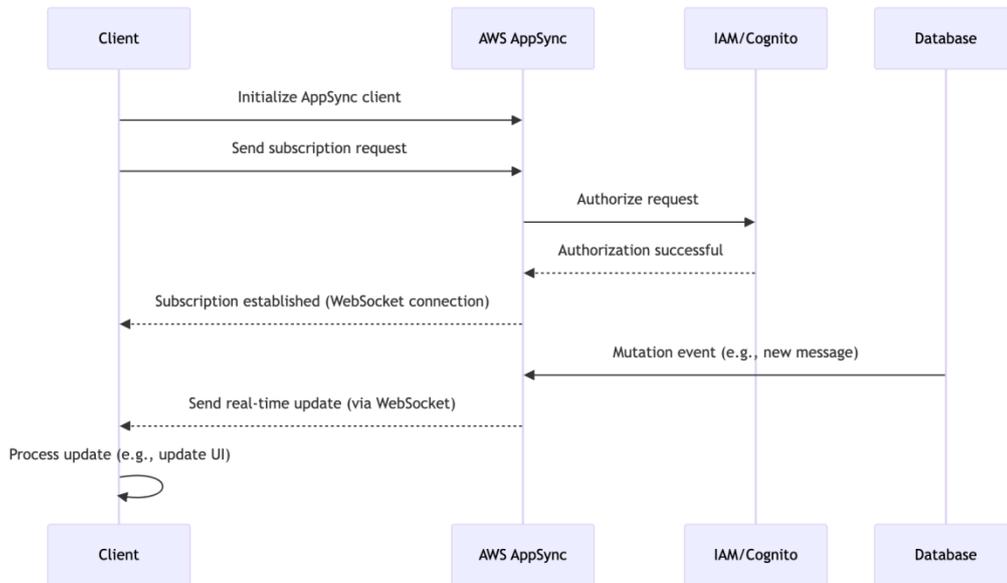


Рис. 5. Схема взаємодії клієнта з AppSync

Таблиця 1

Результати тестування під навантаженням вебсервісу з різними варіантами реалізації отримання інформації в реальному часі

| | Кількість потоків | Кількість запитів за секунду | Середній час відповіді в мілісекундах | Мінімальний час відповіді в мілісекундах | Максимальний час відповіді в мілісекундах |
|---------------|-------------------|------------------------------|---------------------------------------|--|---|
| WebSocket API | 10 | 81 | 127 | 127 | 131 |
| | 20 | 137 | 136 | 135 | 139 |
| | 30 | 212 | 141 | 139 | 146 |
| AppSync | 10 | 119 | 121 | 120 | 125 |
| | 20 | 148 | 138 | 136 | 137 |
| | 30 | 236 | 144 | 142 | 145 |

Не менш важливим питанням є питання вартості використання хмарних сервісів. У випадку AWS AppSync ціноутворення засноване на кількості запитів, з'єднань та передачі даних, що може бути більш вигідним для складних запитів та інтерактивних додатків [12]. Тоді як для API Gateway WebSocket ціноутворення засноване на кількості з'єднань та переданих повідомлень, що виглядає більш прийнятним для простих та постійних з'єднань [13].

Таким чином, основними критеріями для вибору AWS AppSync при розробці хмарного додатку для реалізації комунікації в реальному часі є:

- можливість використання GraphQL;
- необхідність швидкої інтеграції з іншими сервісами AWS (DynamoDB, Lambda, Cognito);
- наявність автоматичного масштабування;
- наявність вбудованої підтримки AWS IAM, Cognito та інших механізмів автентифікації та авторизації.

Висновки. У даному дослідженні було здійснено порівняльний аналіз рішень для реалізації комунікації в реальному часі між сервісами на прикладі AWS AppSync та WebSockets через API Gateway.

На прикладі розробленого вебсервісу проведено тестування зазначених вище технологій, прове-

дено вимірювання швидкодії вебсервісів за допомогою навантажувального тестування, зроблено висновок про оптимальність вибору технології AWS AppSync для розв'язання поставленої задачі та виявлені певні обмеження щодо застосування AWS AppSync.

Практична значимість дослідження полягає у формулюванні основних критеріїв для вибору AWS AppSync при розробці хмарного додатка для реалізації комунікації в реальному часі.

За отриманими результатами можна зробити висновок, що остаточний вибір між AWS AppSync та API Gateway WebSocket залежить від особливостей вимог та архітектури додатку для отримання інформації в реальному часі, таких як складність запитів, вимоги до масштабованості, вартість та рівень необхідної інтеграції з іншими сервісами.

Загалом, використання безсерверної архітектури для реалізації комунікації у реальному часі дозволяє створювати надійні, масштабовані та економічно ефективні системи, які відповідають вимогам сучасних вебдодатків, забезпечуючи високу продуктивність та задоволення користувачів. Це робить безсерверні компоненти ключовими елементами у створенні ефективних рішень для комунікацій у реальному часі.

Список літератури:

1. Dr. Masrath Begum, Pratiksha U., Sushmita B., Varshita V., Vinaykumar J. Build A Serverless Real Time Data Processing Application on AWS. *International Journal of Research Publication and Reviews*. 2023. Vol 4, No 6. P. 3592–3596.
2. Demystifying Real-Time Communication in Web Applications: A Comprehensive Guide to WebSockets and Socket.IO. URL: <https://www.daillac.com/en/blogue/demystifying-real-time-communication-in-web-applications-a-comprehensive-guide-to-websockets-and-socket-io/> (дата звернення 26.06.2024)
3. Adzic G., Chatley R. Serverless computing: Economic and architectural impact. *In Proceedings of the 2017 11th Joint Meeting on Foundations of Software Engineering (ESEC/FSE'17)*. ACM, New York, 2017. P. 884–889.
4. O'Riordan M., Wiggers S.-J. Using Serverless WebSockets to Enable Real-Time Messaging. URL: <https://www.infoq.com/articles/serverless-websockets-realttime-messaging/> (дата звернення 23.06.2024)
5. Roberts M. Serverless Architectures. URL: <https://martinfowler.com/articles/serverless.html> (дата звернення 01.07.24).
6. Serverless with real-time communication (WebSockets). URL: <https://dev.to/oskarkaminski/serverless-with-real-time-communication-websockets-2c6j> (дата звернення 01.07.2024)
7. Amazon API Gateway: Create, maintain, and secure APIs at any scale. URL: <https://aws.amazon.com/apigateway/> (дата звернення 17.06.24).
8. Amazon DynamoDB: Serverless, NoSQL, fully managed database with single-digit millisecond performance at any scale. URL: <https://aws.amazon.com/dynamodb/> (дата звернення 17.06.24).
9. Overview of WebSocket APIs in API Gateway. URL: <https://docs.aws.amazon.com/apigateway/latest/developerguide/apigateway-websocket-api-overview.html> (дата звернення 07.07.24).
10. What is AWS AppSync? URL: <https://docs.aws.amazon.com/appsync/latest/devguide/what-is-appsync.html> (дата звернення 07.07.24)
11. Heyman J., Holmberg L., Baldwin A., Byström C., Hamrén J., Heyman H. What is Locust? URL: <https://docs.locust.io/en/stable/what-is-locust.html> (дата звернення 20.06.24).
12. AWS AppSync pricing. URL: <https://aws.amazon.com/appsync/pricing/> (дата звернення 03.07.24).
13. Amazon API Gateway pricing. URL: <https://aws.amazon.com/api-gateway/pricing/> (дата звернення 03.07.24).

Kyrychenko O.L., Kyrychenko O.O. THE UTILIZATION OF AWS APPSYNC FOR REAL-TIME WEB APPLICATION COMMUNICATION

In this article a comprehensive analysis of AWS AppSync cloud technology's capability to enable effective, reliable, and scalable real-time communication between various web applications is conducted. The study emphasizes the benefits of serverless computing models, particularly their efficient resource utilization and cost-effectiveness compared to maintaining a permanent server infrastructure. A comparative analysis of real-time communication solutions, specifically AWS AppSync and WebSockets via API Gateway, is performed. Practical application examples employing these technologies are developed and scrutinized. The performance of the developed web services, utilizing various approaches to real-time data retrieval, is as-sessed through rigorous load testing. The testing adheres to multiple scenarios that simulate web application behaviours during real-time communication. The results underscore the efficacy of AWS AppSync for the given use case, despite certain identified limitations such as GraphQL usage constraints, request and connection caps, and performance declines when handling large data volumes. Additionally, the cost analysis of the cloud service, influenced by the volume of requests, con-nections, and data transfers, reveals potential cost benefits for complex queries and interactive applications. The study delin-eates key criteria for selecting AWS AppSync in the development of cloud applications aimed at real-time communication. These criteria include scalability, seamless integration with other services, and inherent support for authentication and author-ization mechanisms. The investigation also explores the inherent support for security features and the ease of implementation that AWS AppSync offers, making it a suitable choice for developers aiming to build robust and secure real-time applications. Ultimately, the study concludes that the choice between AWS AppSync and API Gateway WebSocket depends on the specific requirements and architecture of the real-time information retrieval application. Factors such as query complexity, scalability needs, cost considerations, and the necessary level of integration with other services are critical in determining the optimal solution. The comparative analysis provides a detailed understanding of both technologies, highlighting the scenarios where AWS AppSync's advantages can be maximized and identifying potential areas where alternative solutions might be more appropriate. The insights gained from this study serve as a valuable resource for developers and organizations considering the implementation of real-time communication capabilities in their web applications, guiding them towards making informed decisions based on their unique requirements and constraints.

Key words: cloud computing, analytical research, cloud, cloud technologies, serverless architecture, AWS (Amazon Web Services), load testing, web application, web service.

Кисіль А.Ю.

ПрАТ «Вищий навчальний заклад «Міжрегіональна Академія управління персоналом»

МЕТОДОЛОГІЯ ВПРОВАДЖЕННЯ СИСТЕМ МАШИННОГО АНАЛІЗУ ГРАФІЧНИХ ДАНИХ ПРИ ВИКОНАННІ ВІЙСЬКОВИХ ЗАВДАНЬ

У статті проведено аналіз сучасних підходів, що використовуються при проектуванні, розробці та впровадженні нейромережових алгоритмів у системах розпізнавання і класифікації візуальних об'єктів за умов обмеження обчислювального ресурсу і перепускності інформаційних каналів. Представлено базову схему впровадження систем розпізнавання і класифікації візуальних об'єктів на лінії зіткнення, що включає у себе (i) визначення обмежень, що пов'язані з системою реєстрації графічних даних фото- і відеозйомки; (ii) оцінку складових апаратно-програмної платформи системи машинного аналізу; (iii) вибір актуальних процедур машинного аналізу, що можуть бути ефективно виконані у відповідності до обмежень апаратно-програмної платформи; (iv) виконання актуальних завдань з метою визначення ситуаційної обстановки та прийняття рішень у режимі реального часу. Розроблена схема інформаційної системи машинного аналізу масивів графічних даних для військових потреб, що включає у себе три рівні роботи з даними: (i) дані, що підлягають у обробці у режимі реального часу, що включає у себе набори інформаційних вузлів мобільних електронних пристроїв особового складу та мобільних автономних пристроїв; (ii) дані, що регулярно передаються між інформаційними вузлами, що включає у себе набори інформаційних вузлів ретрансляторів та робочих станцій, які здійснюють попередню обробку і структурування і передачу масивів потокових даних; (iii) дані, що перебувають в інформаційному сховищі, що включає у себе набори інформаційних вузлів центрів обробки даних, що безпосередньо пов'язаний з командними центрами. Зазначено, що попередня обробка графічних даних може виконуватись на основі програмних алгоритмів і включає у себе етапи: (i) відновлення графічних даних через побудову математичної моделі розподілу шуму та застосування методів просторової фільтрації; (ii) збільшення роздільної здатності графічних даних, корекція яскравості, контрастності і колірної схеми матриці зображення; (iii) сегментації графічних даних шляхом застосування, морфологічних методів, виділення границь сегментів зображень. При цьому для виділення і класифікації візуальних об'єктів, а також проведення аналізу ситуаційної обстановки було проведено аналіз наступних нейромережових архітектур: (i) автокодувальник і моделі на його основі, як то багаторунний автокодувальник; (ii) зорткова нейромережа та моделі об'єктно-орієнтованого виявлення «Faster R-CNN» та «Mask R-CNN», модель DnCNN для видалення шумів, і моделі на основі нейромережової архітектури глибокого навчання, як то StereoNet і 3D-CNN; (iii) моделі на основі рекурентної нейромережі як то LSTM та GRU, що використовуються для обробки послідовностей зображень.

Ключові слова: машинний аналіз, візуальний об'єкт, нейромережева архітектура, програмні алгоритми, відновлення зображення, військові завдання, лінія зіткнення.

Постановка проблеми. Протягом останніх років спостерігається значний прогрес у галузі машинного аналізу масивів графічних даних фото- і відеозйомки, що включає у себе автоматизацію ряду операцій через впровадження і адаптацію програмних та нейромережових алгоритмів. Посеред найбільш актуальних процедур машинного аналізу фото- і відеоданих можна виділити наступні:

– відновлення матриці зображення через видалення шумів та компенсацію оптичних аберацій [1, 2];

– кластеризація матриці зображення з метою виділення актуальних для подальшого аналізу областей [3, 4];

– виділення та класифікація за ознаками візуальних об'єктів на площині матриці зображення [5, 6];

– відновлення тривимірної сцени у відповідності до діапазонної візуалізації через аналіз набору сполучених двовимірних зображень [7, 8];

– оцінка положення і траєкторії руху візуальних об'єктів у відповідності до простору тривимірної сцени [9, 10].

Зазначений інструментарій є **надзвичайно актуальним** при виконанні ряду військових завдань, як то (i) відновлення і представлення даних аеро- і супутникової зйомки у картографії та розвідці для виявлення ворожих сил і розпіз-

навання військової техніки [11, 12]; (ii) виявлення та супровід рухомих об'єктів на базі керованої ракети та безпілотної літальної пристрою (Unmanned Aerial Vehicle; UAV) з можливістю подальшого масштабування апаратно-програмної платформи для автономного прийняття рішень в бойових умовах [13, 14]; (iii) аналіз ситуаційної обстановки і виявлення у режимі контекстуальних ознак, таких як потенційні загрози з боку противника або можливість для здійснення контр-наступу [15, 16].

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Аналіз наукових досліджень присвячених проблемам впровадження програмних і нейромережових алгоритмів при виконанні широкого кола військових завдань з машинного аналізу масивів графічних даних [11-16] показав необхідність врахування обмежень системи збору поточкових даних у режимі реального часу, як то недоліки системи збору даних фото- і відеозйомки, що є характерними для компактних камер UAV [17, 18], наявний ресурс оперативної пам'яті і розмір інформаційного сховища апаратної платформи, а також обчислювальний ресурс апаратно-програмної платформи, що використовується у польових умовах [19] і пропусковність інформаційних каналів і стабільність роботи комунікаційної мережі [20]. Проведений аналіз надав можливість визначити сфери застосування засобів машинного аналізу при автоматизації завдань ведення розвідки [11, 12], впровадження автономного режиму роботи UAV та керованих ракет [13, 14], а також проведення аналізу ситуаційної обстановки на лінії зіткнення [15, 16]. Представлений інструментарій надає можливість для побудови єдиної інформаційної системи для прийняття рішень у режимі реального часу, що розглядається як *невирішена частина загального дослідження*.

Постановка завдання. Таким чином, метою роботи стала побудова цілісної методології проектування, розробки та впровадження нейромережових алгоритмів у системах розпізнавання і класифікації візуальних об'єктів на лінії зіткнення за умов обмеження обчислювального ресурсу апаратної платформи і пропусковності інформаційних каналів мережових сервісів.

Виклад основного матеріалу дослідження.

1. Постановка задачі машинного аналізу масивів графічних даних для вирішення військових завдань.

Як показав проведений аналіз, методологія проектування системи машинного аналізу маси-

вів графічних даних для вирішення військових завдань включає у себе наступні етапи (рис. 1):

1. Визначення обмежень, що пов'язані з системою реєстрації графічних даних фото- і відеозйомки. При цьому має бути визначено параметри, що визначають розподіл шуму та наявність оптичних аберацій, що надалі можуть бути покладені у основу математичної моделі алгоритмів відновлення зображення [1, 2]. Також на зазначеному етапі необхідно провести оцінку порушення кольорного балансу у відповідності до кольорної схеми фотоматриці та співвіднесення фоточутливості окремих кольорних каналів [21].

2. Визначення складових апаратно-програмної платформи системи машинного аналізу, передачі і збереження даних, що відповідають за обмеження по впровадженню програмних і нейромережових алгоритмів за умов роботи у режимі реального часу, як то оперативна пам'ять, інформаційне сховище, центральний процесор та сопроцесори, а також інформаційні канали комунікаційної мережі [17-19].

3. Вибір актуальних процедур машинного аналізу, що можуть бути ефективно виконані у відповідності до обмежень апаратно-програмної платформи та системи реєстрації графічних даних фото- і відеозйомки, як то відновлення і кластеризація матриці зображення [1-4],

4. Виділення та класифікація за ознаками візуальних об'єктів та груп візуальних об'єктів [5, 6], що представляють інтерес у відповідності до набору завдань. Розвиток відповідного підходу включає у себе оцінку положення, траєкторії руху і взаємодії візуальних об'єктів у відповідності до простору тривимірної сцени [7-10].

5. Аналіз ситуаційної обстановки та автономне прийняття рішень у режимі реального часу у відповідності до вхідних даних [15, 16].

Розвиток інформаційної системи машинного аналізу графічних даних фото- і відеозйомки полягає у створенні алгоритмів виділення високорівневих ознак на основі нейромережевою архітектури глибокого навчання, що надає можливість як оцінити рівень небезпеки, так і сформулювати ефективні сценарії ведення бойових дій, формування укріплень, завчасної евакуації особового складу, тощо. Прямим аналогом впровадження зазначеного підходу є еволюція систем кіберзахисту, завдання проектування яких є подібними до військових завдань, але при цьому більшою мірою піддається формалізації, а тому його рішення набуло значного розвитку протягом двох останніх десятиріч [22-24]. На початковому

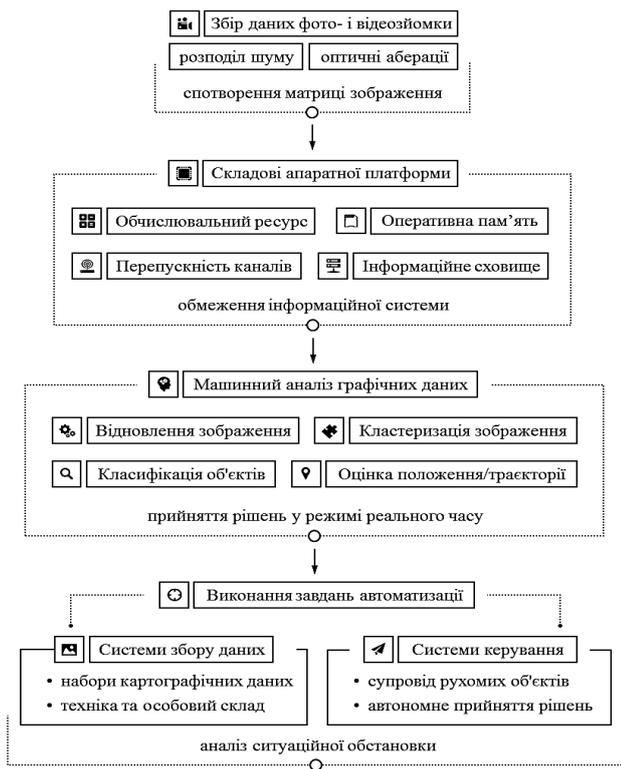


Рис. 1. Діаграма впровадження систем розпізнавання і класифікації візуальних об'єктів на лінії зіткнення

рівні автоматизація процедур, що виконуються у рамках стратегії захисту інформаційної системи, полягала у реалізації вузькоспеціалізованої задачі виділення паттернів потенційних загроз відомого типу [22]. Наступним етапом була оцінка рівня небезпеки через визначення потенційно нових патернів, що відповідають загрозі «нульового дня» [23]. На сьогоднішній день відповідні системи базуються на нейромережових алгоритмах глибокого навчання і реалізують повну автоматизацію процедур прийняття рішень і автоматичного керування у режимі реального часу [24]. У сфері автоматизації військових завдань також можливо поступово реалізовувати повний перехід від неефективних режимів обробки даних «людина-людина» (Person-to-Person; P2P) та «людина-машина» (Person-to-Machine; P2M) до повної автоматизації та тактичному та стратегічному рівні «машина-машина» (Machine-to-Machine; M2M) з нівелюванням проблем, які пов'язані з «людським фактором», що особливо важливо за умов прийняття рішень на лінії зіткнення і прифронтовій зоні.

При цьому можна зазначити, що сучасні нейромережові алгоритми ефективно працюють в умовах неповноти даних, що пов'язані з обмеженою

перепускністю та нестабільністю забезпечення інформаційних каналів прифронтової комунікаційної мережі, недостатніх охопленням інформаційними вузлами мережі аеро- і супутникової розвідки лінії зіткнення, а також втратами масивів даних, що є типовим при веденні бойових дій. Також до неповноти даних можна віднести відсутність цілісних та масштабованих схем формалізації поточкових даних, що з достатньою повнотою характеризують динаміку бойових дій, але можна вказати, що досвід повномасштабної війни надає можливість зазначити інертність сценаріїв, що використовують військово командування противника, навіть попри їх очевидну неефективність [25]. Це надає можливість на рівні системи штучного інтелекту виділяти паттерни ведення бойових дій та супутніх операцій, що забезпечують армію, з подальшою класифікацією і наданням рекомендацій. Нарешті, проектування відповідних систем має включати у себе визначення етичних аспектів і використання штучного інтелекту у військовій сфері для мінімізації ризиків супутніх втрат при автоматизації керування летальними засобами і забезпечення належного для європейської країни рівня гуманності у прийнятті рішень.

2. Організація інформаційної системи машинного аналізу масивів графічних даних.

Розподілену інформаційну систему (Distributed Information System) машинного аналізу масивів графічних даних, що реєструються на лінії зіткнення можна розглядати як сенсорну мережу, дані якої передаються і обробляються онлайн-сервісами центрів обробки даних. Це значною мірою відповідає впровадженню таких концепцій як «інтернет речей» (Internet of Things; IoT) та «інтернет транспортних засобів» (Internet of Vehicles; IoV), що, у свою чергу надає можливість формалізувати архітектуру за рівнями обробки даних (рис. 2).

1. Дані, що підлягають у обробці у режимі реального часу (Data-in-Use, DiU). Зазначений рівень включає у себе набори інформаційних вузлів мобільних електронних пристроїв особового складу та мобільних автономних пристроїв (літальних, морських і наземних дронів), що на рівні математичної моделі формалізується як $i \in [1; I]$ та $j \in [1; J]$, відповідно.

2. Дані, що регулярно передаються між інформаційними вузлами (Data-in-Motion, DiM). Зазначений рівень включає у себе набори інформаційних вузлів ретрансляторів та робочих станцій, що здійснюють попередню обробку і структурування масивів поточкових даних, а також здійснюють передачу даних у відповідності до вхідних запи-

тів та програмованих сценаріїв. У свою чергу, на рівні математичної моделі це формалізується як множини $n \in [1; N]$ та $m \in [1; M]$, відповідно.

3. Дані, що перебувають в інформаційному сховищі (Data-at-Rest, DaR). Зазначений рівень включає у себе набори інформаційних вузлів центрів обробки даних, що безпосередньо пов'язаний з командними центрами, які представлені множиною $k \in [1; K]$ і $l \in [1; L]$, відповідно.

Обробка даних першого рівня (DiU) характеризується мінімальною затримкою і відповідні задачі мають бути виконанні у режимі реального часу. Водночас, ресурс апаратної платформи мобільних електронних пристроїв та, зокрема, авіоніки UAV є мінімальним, а отже виникає необхідність у розробці ефективних програмних алгоритмів, що на основі мінімального набору доступних даних, ресурсу пам'яті та обчислювального ресурсу здатні виконувати процедури машинного аналізу. На другому рівні (DiM), інформаційні вузли якого розташовуються у прифронтовій зоні, апаратна платформа характеризується більшим ресурсом, а набори вхідних даних є достатньо великими, а отже може необхідно розглянути впровадження нейромережевої архітектури для попередньої обробки, класифікації та кластеризації даних. На третьому рівні апаратна платформа є найбільш потужною, але передача потокових даних зазнає найбільшої затримки.

На цьому рівні проходить аналіз ситуаційної обстановки, а отже може бути застосована нейромережева архітектура глибокого навчання для виділення високорівневих ознак потокових даних, що надходять з усього набору інформаційних вузлів мережі. На рівні організації сучасної мережевої інфраструктури це відповідає переходу від хмарних обчислень (Cloud Computing) до туманних обчислень (Fog Computing; FC) та росистих обчислень (Dew Computing; DC) за схемою «DaR → DiM → DiU» [26, 27]. Таким чином розуміння набору завдань, які вирішуються інформаційною системою на кожному з етапів, дозволяє оптимізувати інфраструктуру апаратно-програмної платформи.

3. Проектування програмних і нейромережевих алгоритмів машинного аналізу масивів графічних даних

Програмні алгоритми машинного аналізу масивів графічних даних широко використовуються на етапі попередньої обробки матриці зображення (Preliminary Image Processing; PRIP), що дозволяє суттєво збільшити показники швидкості і точності розпізнавання об'єктів на рівні

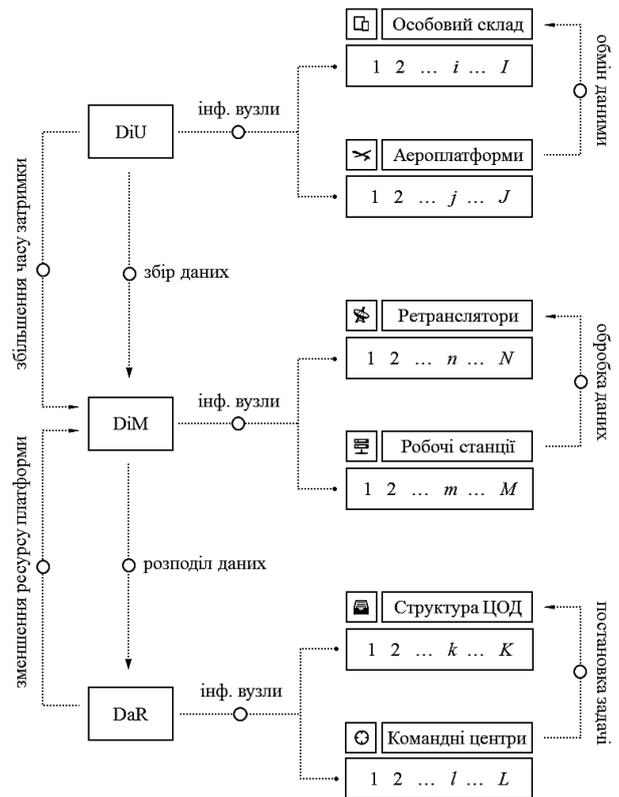


Рис. 2. Організація інформаційної системи машинного аналізу масивів графічних даних для військових потреб

нейромережевих алгоритмів. Як було показано вище, набір задач, що виконується на зазначеному етапі є надзвичайно широким, що зумовлює застосування та адаптацію відповідних математичних моделей:

1. Відновлення графічних через побудову математичної моделі розподілу шуму та застосування методів просторової фільтрації [28]. Зазначені процедури застосовуються при обробці даних аеророзвідки, що сприяє більш точному аналізу зображень для виявлення та ідентифікації військових об'єктів, як то ворожа техніка або укріплення, а також уточнення картографічних даних. Характерно, що при веденні розвідки відсутність штучного освітлення та несприятливі погодні умови можуть бути до високого рівня шумів, фільтрація яких полегшує проведення аналітики на рівні впровадження систем автоматичного розпізнавання.

2. Збільшення роздільної здатності графічних даних, корекція яскравості, контрастності і колірної схеми матриці зображення [29]. Відповідні процедури також широко використовуються при роботі з графічними даними, що отримані в умовах низької освітленості.

3. Сегментація графічних даних шляхом застосування, морфологічних методів для роботи з монохромними матрицями зображень, виділення границь сегментів зображень методом зв'язкових компонент та граничними методами [30]. Військове застосування: Сегментація допомагає виділити групи важливих об'єкти на матриці зображення, як то колони транспортних засобів, елементи забудови та особливості ландшафту, що не відображені на карті. Використання алгоритмів ерозії та дилатації для відокремлення об'єктів від фону дозволяє більш точно виявляти рухомі цілі. Відповідні операції можуть бути покладені у основу виділення границь візуальних об'єктів з застосуванням графічних примітивів.

Впровадження нейромережових алгоритмів також потребує формування системи оцінки ефективності виділення і класифікації візуальних об'єктів. Розробка математичної моделі, яка узагальнює принципи роботи нейромережової архітектури, за рахунок чого можна визначити ефективність розпізнавання у відповідності до максимумів цільових функцій точності класифікації та часу обробки фіксованого об'єму поточкових даних у відповідності до поставленого завдання та ресурсу апаратної платформи.

У рамках дослідження було виділено наступні нейромережові архітектури та моделі на їх основі, що можуть бути ефективно використані для вирішення поставленого завдання:

1. Архітектура автокодувальник [31, 32], та зокрема модель автокодувальника, що призначена для компенсації шумів (Denoising Autoencoder; DAE) у відповідності до структурних особливостей зображення незалежно від природи шумів та типу розподілу. Натомість нейромережева архітектура глибокого навчання багаторусний автокодувальник ефективно використовується для виділення високорівневих ознак.

2. Згорткова нейромережа (Convolutional Neural Networks; CNN) призначена для виділення та класифікації візуальних об'єктів за ознаками [33, 34]. Сучасними моделями об'єктно-орієнтованого виявлення є «Faster R-CNN» та «Mask R-CNN», виділення ознак на їх основі може бути використано і для кластеризації матриці зображення, що є більш

ефективним ніж при застосуванні програмних алгоритмів. Слід зазначити, що модель DnCNN, також використовується для видалення шумів з матриці зображення, через включення у архітектуру відповідних згорткових шарів, що виявляють та усувають шуми. Моделі на основі нейромережової архітектури глибокого навчання, як то StereoNet і 3D-CNN, використовуються для відновлення глибини сцени шляхом аналізу пар стереозображень, а також аналізу просторово-часових змін, що важливо для оцінки траєкторій руху.

3. Моделі на основі рекурентної нейромережі (Recurrent Neural Networks; RNN), як то LSTM та GRU [35, 36], використовуються для обробки послідовностей зображень та виділення інформації про глибину сцени з метою прогнозування траєкторій об'єктів на основі аналізу послідовностей зображень.

Проведений аналіз надає можливість обрати окремий тип нейромережової архітектури у поєднання з програмними алгоритмами для вирішення широкого кола завдань, що спрощує загальний комплекс апаратно-програмної платформи відповідної інформаційної системи.

Висновки. У результаті проведеного дослідження було проаналізовано особливості проектування, розробки та впровадження нейромережових алгоритмів у системах розпізнавання і класифікації візуальних об'єктів на лінії зіткнення за умов обмеження обчислювального ресурсу і перепускності інформаційних каналів відповідної апаратної платформи.

При цьому у рамках дослідження було:

- визначено принципи впровадження систем розпізнавання і класифікації візуальних об'єктів на лінії зіткнення;
- запропоновано схему організації інформаційної системи машинного аналізу масивів графічних даних для військових потреб;
- розглянуто підходи з проектування програмних і нейромережових алгоритмів машинного аналізу масивів графічних даних.

Таким чином, представлена методика може бути використана для проектування програмних і нейромережових алгоритмів на всіх рівнях інформаційної системи машинного аналізу.

Список літератури:

1. Ren Y., Tang L. A nonconvex and nonsmooth anisotropic total variation model for image noise and blur removal. *Multimedia Tools and Applications*. 2019. № 79 (1-2). P. 1445-1473. doi:10.1007/s11042-019-08179-8.
2. Seelamantula C. S., Blu T. Image denoising in multiplicative noise. *IEEE International Conference on Image Processing (ICIP)*. 2015. doi:10.1109/icip.2015.7351056.

3. Lingala M. et al. Fuzzy logic color detection: Blue areas in melanoma dermoscopy images. *Computerized Medical Imaging and Graphics*. 2014. № 38 (5). P. 403-410. doi:10.1016/j.compmedimag.2014.03.007.
4. Karim T., Tasneem T. Analytical Adjustment of Image Contrast. *International Journal of Computer Applications*. 2014. № 98(20). P. 44-49. doi:10.5120/17303-7794.
5. ImageNet Large Scale Visual Recognition Challenge / Russakovsky O., Deng J., Su H. Krause J., Satheesh S. et al. *International Journal of Computer Vision*. 2015. №115 (3). P. 211-252.
6. Heitz G. et al. Shape-based object localization for descriptive classification. *International Journal of Computer Vision*. 2009. № 84 (1). P. 40-62.
7. DePos: Accurate orientation-Free Indoor Positioning with Deep Convolutional Neural Networks / Shao W., Luo H., Zhao F., Wang C., Crivello A., Tunio M. Z. *Ubiquitous Positioning, Indoor Navigation and Location-Based Services (UPINLBS)*. 2018. doi:10.1109/upinlbs.2018.8559764.
8. Hybrid visual and inertial RANSAC for real-time motion estimation / Alibay M., Auburger S., Stanciulescu B., Fuchs P. *IEEE International Conference on Image Processing (ICIP)*. 2014. doi:10.1109/icip.2014.7025035.
9. Azawi N., Gauch J. Ransac Based Motion Compensated Restoration for Colonoscopy Images. *Signal Image Processing: An International Journal*, 2019. №10 (4). P. 9-16. doi:10.5121/sipij.2019.10402.
10. Stanciulescu B. Background to Structure from Motion. *Structure from Motion in the Geosciences*. 2016. P. 37-59. doi:10.1002/9781118895818.ch3.
11. A UAV Detection Algorithm Based on an Artificial Neural Network / Zhang H., Cao C., Xu L., Gulliver T.A. *IEEE Access*. 2018. № 6. P. 24720-24728.
12. Liming G. et al. Military Unmanned Equipment Image Target Recognition Method based on Improved Deep Learning. *Phys J.: Conf. Ser.* 2024. 2732 01200. DOI: 10.1088/1742-6596/2732/1/012004.
13. Active Perception using Neural Radiance Fields / He S., Hsu C.D., Ong D., Shao Y., Chaudhari P. *ArXiv*. 2023. *abs/2310.09892*. DOI:10.48550/arXiv.2310.09892.
14. Hsu C.D., Chaudhari P. Active Scout: Multi-Target Tracking Using Neural Radiance Fields in Dense Urban Environments. *ArXiv*. 2024. *abs/2406.07431*.
15. Evidence of elevated situational awareness for active duty soldiers during navigation of a virtual environment / Enders L. R., Gordon S. M., Roy H., Rohaly T., Dalangin B., Jeter A., Villarreal J., Boykin G. L., Touryan J. *PLoS ONE*. 2024. № 19(5). doi: <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0298867>.
16. Cummings M. Artificial intelligence and the future of warfare. London: Chatham House for the Royal Institute of International Affairs, 2017.
17. Shoker S. Learning to see data: Military-age males and drone warfare. *Military-Age Males in Counterinsurgency and Drone Warfare*, 2020. P. 131-193. doi: https://doi.org/10.1007/978-3-030-52474-6_4.
18. Purwono N., Syetiawan A. Application of UAV with fish-eye lenses camera for 3D surface model reconstruction application of UAV with fish-eye lenses camera for 3D Surface Model Reconstruction. *Geoplanning: Journal of Geomatics and Planning*. 2018. № 5(1). P. 115. doi: <https://doi.org/10.14710/geoplanning.5.1.115-130>.
19. Han T. Compact military-grade PC FES6128. *Acnodes* : website. 2024. URL: <https://www.acnodes.com/fes6128.htm>.
20. Tarihi M., Noori M. M., Madani M. Improving the Performance of HALE UAV Communication Link Through MIMO Cooperative Relay Strategy. *Wireless Personal Communications*. 2020. №113 (2). P. 1051-1071. doi:10.1007/s11277-020-07267-5.
21. Беляк Є.В. Оптимізація системи фотореєстрації через застосування покриття на основі наноструктурованих люмінофорів. *Реєстрація, зберігання і обробка даних*. 2022. Т. 24. № 1. С. 1-64. DOI: 10.35681/1560-9189.2022.24.1.262657.
22. Munir K. Security model for Mobile Cloud Database as a service (DBaaS). *Cloud Security*. 2019. P. 760-769. doi: <https://doi.org/10.4018/978-1-5225-8176-5.ch038>.
23. Nguyen T.-T., Shieh C.-S., Chen C.-H., Miu D. Detection of unknown ddos attacks with deep learning and gaussian mixture model. *4th International Conference on Information and Computer Technologies (ICICT)*. 2021. <https://doi.org/10.1109/iciict52872.2021.00012>.
24. Shukla P., Krishna C. R., Patil N. V. Eiot-DDoS: Embedded Classification Approach for IOT traffic-based DDoS attacks. *Cluster Computing*. 2023. №2 (1). <https://doi.org/10.1007/s10586-023-04027-5>.
25. Shpachuk V., Chen S. *The Russian invasion of Ukraine: Business impacts, risks, and opportunities*. SAGE Publications: SAGE Business Cases Originals, 2024.
26. Metheny M. Security and Privacy in Public Cloud Computing. *Federal Cloud Computing*, 2013. P. 71-102. doi:10.1016/b978-1-59-749737-4.00004-6.
27. Cheng P., Qu H. Design and Realization Based on Cloud Stack Hybrid Cloud Computing Platform. *Advanced Materials Research*. 2014. P. 989-994, 2297-2300.
28. Zhang C., Liu W., Xing W. Color image enhancement based on local spatial homomorphic filtering and gradient domain variance guided image filtering. *Journal of Electronic Imaging*. 2018. №27(06). doi:10.1117/1.jei.27.6.063026.

29. Karim T., Tasneem T. Analytical Adjustment of Image Contrast. *International Journal of Computer Applications*. 2014. №98(20). P. 44-49. doi:10.5120/17303-7794.
30. Schmitt M. On Two Inverse Problems in Mathematical Morphology. *Mathematical Morphology in Image Processing*. 2018. P. 151-169. doi:10.1201/9781482277234-5.
31. Suzuki Y., Ozaki T. Stacked Denoising Autoencoder-Based Deep Collaborative Filtering Using the Change of Similarity. *31st International Conference on Advanced Information Networking and Applications Workshops (WAINA)*. 2017. doi:10.1109/waina.2017.72.
32. Menezes J., Poojary N. Hyperspectral image Data Classification with Refined Spectral-Spatial features based on Stacked Autoencoder approach. *Recent Patents on Engineering*. 2019. №13. doi:10.2174/187221211366619091114 1616.
33. Performance evaluation of faster R-CNN on GPU for object detection / Adam B., Zaman F., Yassin I., Abidin H., Rizman Z. *Journal of Fundamental and Applied Sciences*. 2018. №9 (3S). P. 909.
34. Mask-CNN: Localizing parts and selecting descriptors for fine-grained bird species categorization / Wei X., Xie C., Wu J., Shen C. *Pattern Recognition*. 2018. №76. P. 704-714.
35. Impact of training LSTM-RNN with Fuzzy Ground Truth / Jenckel M., Parkala S. S., Bukhari S. S., Dengel A. Proceedings of the 7th International Conference on Pattern Recognition Applications and Methods. 2018. doi: <https://doi.org/10.5220/0006592703880393>.
36. Zhao B., Li X., Lu X. HSA-RNN: Hierarchical structure-adaptive RNN for video summarization. *IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*. 2018. doi: <https://doi.org/10.1109/cvpr.2018.00773>.

Kysil A. Yu. METHODOLOGY FOR IMPLEMENTING MACHINE ANALYSIS SYSTEMS OF GRAPHICAL DATA IN MILITARY OPERATIONS

An analysis of modern approaches used in the design, development, and implementation of neural network algorithms in recognition and classification systems of visual objects under conditions of limited computational resources and information channel bandwidth has been conducted. A basic scheme for implementing recognition and classification systems of visual objects on the frontline is presented, which includes: (i) identifying constraints associated with the graphical data recording system from photo and video shoots; (ii) assessing the components of the hardware-software platform of the machine analysis system; (iii) selecting relevant machine analysis procedures that can be effectively executed according to the constraints of the hardware-software platform; (iv) performing relevant tasks to determine the situational environment and make decisions in real-time. An information system scheme for machine analysis of graphical data arrays for military needs has been developed, which includes three levels of data processing: (i) real-time data processing, which includes sets of information nodes of mobile electronic devices of personnel and mobile autonomous devices; (ii) data regularly transmitted between information nodes, including sets of information nodes of relays and workstations that perform preliminary processing, structuring, and transmission of streaming data arrays; (iii) data in an information repository, including sets of information nodes of data processing centers directly connected to command centers. It is noted that preliminary processing of graphical data can be performed based on software algorithms and includes the stages: (i) restoration of graphical data through the construction of a mathematical model of noise distribution and the application of spatial filtering methods; (ii) increasing the resolution of graphical data, correction of brightness, contrast, and color scheme of the image matrix; (iii) segmentation of graphical data by applying morphological methods, highlighting image segment boundaries. For the identification and classification of visual objects, as well as situational environment analysis, the following neural network architectures were analyzed: (i) autoencoder and models based on it, such as the stacked autoencoder; (ii) convolutional neural network and object-oriented detection models "Faster R., CNN" and "Mask R., CNN", DnCNN model for noise removal, and models based on deep learning neural network architecture, such as StereoNet and 3D CNN; (iii) models based on recurrent neural networks such as LSTM and GRU, used for processing sequences of images.

Key words: machine analysis, visual object, neural network architecture, software algorithms, image restoration, military operations, frontline.

Кримська А.О.

Чернівецький торговельно-економічний інститут
Державного торговельно-економічного університету

КЛЮЧОВА РОЛЬ ПОЛІГРАФОЛОГІЧНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ У СТРАТЕГІЯХ УПРАВЛІННЯ ІНФОРМАЦІЙНОЮ БЕЗПЕКОЮ В ЕКОНОМІЧНИХ ГАЛУЗЯХ

Стаття присвячена ролі поліграфів у забезпеченні додаткового рівня безпеки та контролю доступу до конфіденційної інформації в різних галузях економіки. Це зумовлено необхідністю зменшення ризику витоку даних через недбалість або злочинну діяльність, що може серйозно зашкодити фінансовій стабільності та репутації підприємств. З'ясовано, що поліграфічні дослідження дозволяють перевірити автентичність і надійність персоналу, що має доступ до важливої інформації. Це допомагає зменшити ризик витоку даних та виявити потенційні загрози зсередини. У статті розкрито, що використання поліграфа дозволяє оцінити ступінь благонадійності співробітників та їхню готовність дотримуватися внутрішніх політик інформаційної безпеки. Виявлено, що поліграфічні перевірки дозволяють ідентифікувати потенційні загрози зсередини організації. Це включає виявлення несанкціонованого доступу до конфіденційної інформації та правопорушень, що можуть виникнути в економічних секторах, де інформаційна безпека є критичною для фінансової стабільності та репутації підприємств. У статті розкрито, що поліграфія стає інструментом попередження внутрішніх конфліктів та кіберзагроз. В умовах зростання кіберзагроз та внутрішніх конфліктів, поліграфічні перевірки стають важливою частиною управління ризиками та внутрішньої безпеки. Це допомагає підвищити рівень внутрішньої дисципліни та зменшити внутрішні загрози, які можуть походити від неправомірних дій співробітників. Розкрито, що інтеграція поліграфічних досліджень у стратегію інформаційної безпеки дозволяє підприємствам ефективно захищати свою інформацію та ресурси від внутрішніх загроз. Виявлено, що поліграфічні перевірки повинні проводитися з дотриманням етичних норм і прав працівників, щоб не порушувати їхні права та свободи. Це включає обов'язкову інформованість працівників про процедуру перевірки, отримання їхньої згоди на проведення поліграфічних досліджень та дотримання конфіденційності отриманих даних. Зазначено, що поліграфія стає потужним інструментом у загальному комплексі заходів щодо забезпечення інформаційної безпеки підприємств. Вона сприяє збереженню фінансової стабільності підприємств та зміцненню їхньої репутації.

Ключові слова: інформаційна безпека, управлінські стратегії, економічна безпека, поліграфологія, кіберзагрози.

Постановка проблеми. Становлення інформаційного суспільства характеризує суспільний розвиток. Створення єдиного світового інформаційного ринку є одним із напрямків, в якому бере участь Україна. Інформаційний фактор може бути використаний для захисту державних інтересів. Широкий і оперативний доступ для підвищення інформаційної ефективності є частиною процесів установ. Інформатизація сучасного суспільства включає впровадження новітніх систем обробки інформації та телекомунікацій. Для забезпечення інформаційної безпеки використовуються поліграфічні дослідження. Отримати об'єктивні дані щодо достовірності та правдивості інформації, яку надають співробітники та партнери підприємства, можна за допомогою поліграфа чи детектора брехні. За допомогою поліграфа можна визначити загрози з часом.

Вивчення проблем інформаційної безпеки є тим, що веде до розвитку інформаційних технологій. Існують заходи безпеки, які використовуються. Є перешкоди, які потрібно подолати. Існують дослідження, за допомогою яких можна знайти вразливі місця. Ви можете отримати цінну інформацію, провівши ці дослідження. Інформаційна безпека – це набір засобів, методів і процесів, які забезпечують захист інформаційних активів і гарантують збереження ефективності та практичної придатності як технічної інфраструктури інформаційних систем, так і інформації, що зберігається та обробляється при такій оцінці та аналізі. Використання поліграфа допомагає захистити територіальну цілісність і суверенітет України, що є частиною концептуальних засад суспільства.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Вміщено праці як вітчизняних, так і зарубіжних учених. А. Баранова, О. В. Глазова, Т. Г. Каткова та ін. Враховуючи думки авторів, необхідно приділити більшу увагу дослідженню проблем поліграфології в інформаційній безпеці, яка є пріоритетною складовою національної безпеки України. Перевірка на поліграфі використовується в системі захисту інформації.

Отримати об'єктивні дані щодо достовірності та правдивості інформації, що надається співробітниками та партнерами підприємства, можливо за допомогою поліграфа. Це може бути особливо корисним під час найму нових співробітників, проведення внутрішніх розслідувань і виявлення загроз зсередини організації. Актуальність дослідження проблем інформаційної безпеки залежить від активного розвитку інформаційних технологій. Для захисту інформаційних ресурсів використовуються різні засоби та заходи захисту.

Перешкоди для проникнення Є уразливості в системі захисту інформації. Перевірка на поліграфі допомагає виявити вразливі місця в системі захисту інформації, а також оцінити потенційні загрози, що дозволяє своєчасно розробити ефективні заходи щодо їх запобігання. Він забезпечує надійний захист інформаційних активів і підвищує загальний рівень інформаційної безпеки підприємства.

Загалом під інформаційною безпекою слід розуміти сукупність засобів, методів і процесів, які забезпечують захист інформаційних активів і, як наслідок, гарантують збереження ефективності та практичної корисності як технічної інфраструктури інформаційних систем, так і інформації зберігаються і переробляються в таких.

Постановка завдання. Мета статті полягає в дослідженні та аналізі ключової ролі поліграфологічних досліджень у стратегіях управління інформаційною безпекою в економічних галузях. У сучасних умовах глобалізації та зростання кіберзагроз, забезпечення надійного захисту конфіденційної інформації стає критично важливим завданням для підприємств різних секторів економіки. Поліграфічні перевірки надають можливість оцінити надійність та благонадійність персоналу, що має доступ до важливої інформації, з метою зменшення ризику витоку даних та виявлення потенційних загроз зсередини.

У контексті зовнішніх і внутрішніх загроз, а також його взаємозв'язку з перевітками на поліграфі постає завдання обґрунтувати використання

новітніх технологій в інформаційній безпеці держави. Кількість кіберзагроз зростає. Штучний інтелект можна використовувати для аналізу великих обсягів даних і пошуку незвичайних шаблонів, які вказують на можливі атаки або витік інформації. Ви можете використовувати штучний інтелект для автоматизації процесів моніторингу та реагування на кіберінциденти. Тести на поліграфі можна використовувати з технологіями, які зосереджені на внутрішніх загрозах. Аналіз реакції людини на подразники – це те, на чому вони базуються. Інтеграція вигаданого розуму з поліграфом ускладнює можливості атак і дає комплексний підхід до захисту інформаційних ресурсів держави.

Виклад основного матеріалу дослідження. Здатність держави долати кризові явища в разі зовнішньої агресії є одним із найважливіших факторів забезпечення реалізації національних інтересів. Своєчасні та ефективні заходи щодо інформаційної безпеки з боку держави здатні подолати загрози соціально-економічному та політичному життю країни. Індустрія номер один у світі – це оборона та безпека, і вона зазнає серйозних змін через впровадження технологій штучного інтелекту. [2, с. 16].

У майбутньому дані технології можуть бути використані для зміни поведінки людей, соціальних стосунків і впливу на особистість людини.

Штучний інтелект в інформаційній безпеці дозволяє автоматизувати виявлення та аналіз потенційних кіберзагроз, що допомагає швидко реагувати на них і скорочувати час реакції. Системи машинного та глибокого навчання можуть аналізувати великі обсяги даних, щоб знаходити аномалії, які можуть вказувати на загрози інформаційній безпеці. перевірки на поліграфі можуть бути застосовані до внутрішньої безпеки, де аналіз відповідей може виявити загрози з боку співробітників або інших внутрішніх джерел. Інтеграція двох підходів дозволяє створити систему захисту, яка враховує як технічні, так і поведінкові аспекти. Програмне забезпечення безпеки, яке добре працювало в минулому, було обійдено кіберзлочинцями.

2 грудня 2020 року в Україні Розпорядженням Кабінету Міністрів України №1556-р було схвалено Концепцію розвитку вигаданого розуму в Україні [3], яка передбачає визначення основних напрямів та пріоритетних завдань розвитку технологій з метою забезпечення конкурентоспроможності національної економіки (рис. 1).



Рис. 1. Основні напрями забезпечення інформаційної безпеки

Джерело: [3]

Штучний інтелект здається дорогим і неперевереним рішенням, на яке йдуть лише інноваційні компанії з великим бюджетом. Усі компанії потребують його використання в управлінні інформаційною безпекою, незалежно від їх розміру. Ландшафт загроз змінюється блискавично зі збільшенням кількості атак. Продукти Kaspersky запобігають понад 700 мільйонів онлайн-атак на квартал, тоді як Cisco блокує 20 мільярдів мережових атак на день. Зловмисники використовують ці технології для їх удосконалення та трансформації, а також для обходу відомих засобів захисту з великою злочинною діяльністю. Група, що стоїть за створенням Emotet, може легко використовувати штучний інтелект для посилення атаки, оскільки основним каналом його поширення є спам-фішинг.

Більш ефективний вибір пароля є одним із способів використання в зловмисних цілях. Технології були використані для створення бота, який зміг обійти перевірку CAPTCHA. Використовуючи велику кількість різноманітних джерел даних у темній мережі з метою формування бази знань неприродних даних, де зловмисники можуть створювати атаки, тому виробники систем захисту починають активно впроваджувати технології машинного навчання [5]. Світовий ринок технологій в інформаційній безпеці оцінювався експертами в 8,8 млрд доларів США в 2019 році, і очікується, що він досягне 38,2 млрд доларів США в 2026 році (рис. 1) [7]. Основні фактори росту:

- 1) Зростає кількість підключених пристроїв
- 2) Зростає кількість користувачів Інтернету
- 3) Зросла кількість випадків кіберзагроз
- 4) Зростає вразливість мережі до загроз безпеки.

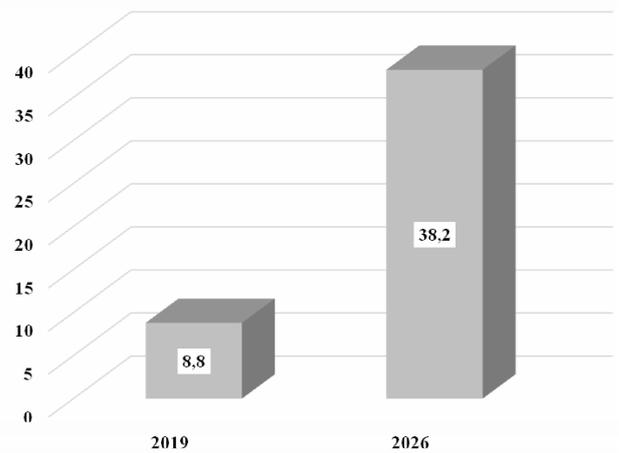


Рис. 2. Прогноз об'єму світового ринку штучного розуму в інформаційній безпеці на 2019–2026 рр., млрд дол. США

Джерело: [8]

Висновки. Технологічна майстерність і прогрес останнього десятиліття привернули увагу багатьох державних адміністрацій. Перетворення технологічних можливостей у конкретну бізнес-цінність для компаній і суспільну цінність від органів державної влади, які використовують технології, було обмеженим. Відсутність можливостей в організації є однією з причин повільного прогресу у впровадженні в державне правління. Його часто розглядають як технічну експертизу в надуманому розумовому середовищі, але можливості технології розуміються ширше.

Для того, щоб державні адміністрації могли ефективно розвивати та використовувати штучний інтелект, існують різні технічні та нетехнічні компоненти. Сфери державного ладу, які є відносно зрілими з точки зору несправжнього глузду в своїх країнах, знаходяться в центрі уваги цього дослідження. У дослідженні використано декілька прикладів. Набуття можливостей, де взаємодоповнення та взаємодія між різними компонентами державних адміністрацій, які ще не використовують технології штучного інтелекту, можуть дати різні результати. Технології використовуються в державному управлінні.

З розвитком галузі деякі проблеми, можливо, уже вирішено. Якісний характер дослідження підтримує кількісні дослідження. Внесок у продуктивність організації є одним із критеріїв аналізу. Під час більш детального розгляду концепцій і компонентів було виявлено кілька питань, які не можна було вивчити так глибоко, як хотілося. Майбутні дослідження можуть досліджувати проблеми отримання такого ума різними способами.

Існує низка різних технологій, які досліджують штучний інтелект, і сектори державних послуг, які їх використовують. Країни зі складними відносинами з сусідами – Індія, Нідерланди, Пакистан, Тайвань, Україна, Велика Британія.

Розташування доменів і мережеві шляхи, через які до них йде трафік громадян, визначаємо нами. У шести країнах були різні стратегії. Деякі уряди зберігають більший суверенітет, ніж інші, але вони не можуть претендувати на незалежність, оскільки залежать від Інтернету. Територіальність не варто порівнювати з іншими речами. Існують компроміси між ризиками та залежністю. На дружніх і потужних іноземних провайдерів можна покласти, якщо існує загроза вторгнення або брак національних можливостей для захисту цифрової інфраструктури.

Досі тривають дебати щодо пошуку цифрового суверенітету. Держави мають вирішити, як вони хочуть управляти цими ризиками проти переваг, які надають цифрові технології для сприяння належному врядуванню, ефективного високотехнологічного потенціалу ефективних у часі послуг, коли вони стануть доступними для широкомасштабного розгортання. Таке рішення має право приймати державний орган. Завдяки використанню більш сучасного обладнання та програмного забезпечення, конструкції в усьому світі переживають поворотний момент.

У разі стрімкого розвитку технологій потенціал інформаційно-технічного та інформаційно-психологічного впливу буде значним. Штучний інтелект – це програмне забезпечення, яке здатне інтерпретувати стан навколишнього середовища, розпізнавати певні події та виконувати необхідні дії. Технології можна використовувати для моніторингу загроз.

Дослідження інтеграції штучного інтелекту в державному управлінні, а саме вивчення методів ефективного впровадження технологій штучного інтелекту в різних сферах державного управління включає розробку конкретних планів дій, рекомендацій щодо адаптації існуючих процесів та оцінку можливих перешкод і бар'єрів. Аналіз впливу штучного інтелекту на підвищення ефективності та продуктивності державних адміністрацій. Це може включати порівняння показників ефективності до і після впровадження технологій, а також оцінку економічного ефекту.

Технологічні та нетехнологічні компоненти дослідження взаємодії між технічними та нетех-

нічними компонентами в державних адміністраціях – це запорука аналізу взаємозв'язку між людськими ресурсами, організаційною культурою та процесами управління. Аналіз можливостей для підвищення ефективності за допомогою технологічних інновацій. Також включає вивчення потенціалу різних інноваційних технологій для оптимізації адміністративних процесів, зниження витрат та покращення якості послуг.

Країни з різними стратегіями розвитку технологій, де порівняльний аналіз стратегій розвитку технологій у державних адміністраціях різних країн. Такий спосіб дозволить визначити найкращі практики, а також виявити слабкі місця в підходах різних держав. Дослідження впливу геополітичних факторів на впровадження технологій штучного інтелекту в державне управління. Це включає вивчення, як міжнародні відносини, економічні санкції та інші зовнішні фактори впливають на можливості впровадження технологій.

Цифровий суверенітет та управління ризиками: дослідження підходів до досягнення цифрового суверенітету у різних країнах. Це передбачає аналіз політик і стратегій, спрямованих на забезпечення контролю над національними цифровими ресурсами та інфраструктурою. Аналіз компромісів між ризиками та перевагами використання цифрових технологій у державному управлінні. Це включає вивчення потенційних загроз кібербезпеки та розробку стратегій для мінімізації ризиків.

Інформаційно-технічний та інформаційно-психологічний вплив: дослідження потенціалу інформаційно-технічного та інформаційно-психологічного впливу сучасних технологій. Це включає аналіз можливостей для використання технологій у моніторингу суспільних настроїв, боротьбі з дезінформацією та підтримці громадського порядку. Аналіз використання технологій для моніторингу та реагування на загрози. Це передбачає вивчення способів використання штучного інтелекту та інших технологій для виявлення та попередження потенційних загроз, таких як кіберзлочинність, тероризм та інші небезпеки.

Подальші дослідження в цих напрямках допоможуть краще зрозуміти потенціал і виклики використання технологій у державному управлінні, а також сприятимуть розробці ефективних стратегій їх впровадження.

Список літератури:

1. Гуржій Т. Інформаційне право: виклики гібридної війни. *Зовнішня торгівля: економіка, фінанси, право*. 2018. № 4. С. 16–26.

2. Концепція розвитку штучного інтелекту в Україні [Електронний ресурс]: Розпорядження Кабінету міністрів України № 1556-р від 02.12.2020. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1556-2020-%D1%80#Text> (дата звернення: 07.12.2021).
3. Ніщименко О. А. Інформаційна безпека України на сучасному етапі розвитку держави і суспільства. *Наше право*. 2016. № 1. С. 17–23.
4. Укроборонпром хоче використовувати штучний інтелект в «оборонці». URL: <https://www.epravda.com.ua/news/2021/08/26/677230> (дата звернення: 07.12.2021).
5. Artificial Intelligence (AI) In Cyber Security Market Will Reach to USD 30.9 Billion By 2025: Zion Market Research. URL: <https://www.globenewswire.com/news-release/2019/08/28/1907655/0/en/Artificial-Intelligence-AI-In-Cyber-Security-Market-Will-Reach-to-USD-30-9-Billion-By-2025-Zion-Market-Research.html> (accessed 22 January 2024).
6. Artificial Intelligence in Cybersecurity Market by Offering. URL: <https://www.marketsandmarkets.com/Market-Reports/artificial-intelligence-ai-cyber-security-market-220634996.html> (accessed 22 January 2024).
7. Jeschke S., Brecher C., Song H., Rawat D.B. *Industrial Internet of things and cyber manufacturing systems*. Cham: Springer International Publishing Switzerland. 2017. Vol. 3, pp. 3–19.
8. Leveraging artificial intelligence to maximize critical infrastructure cybersecurity. URL: <https://www.thalesgroup.com/en/worldwide/security/magazine/leveraging-artificial-intelligence-maximize-critical-infrastructure> (accessed 22 January 2024).
9. Pretorius B., van Niekerk B. Cyber-security for ICS/SCADA. *International Journal of Cyber Warfare and Terrorism*. 2016. Vol. 6. P. 1–16.
10. Nesterov V. Integration of artificial intelligence technologies in data engineering: Challenges and prospects in the modern information environment. *Bulletin of Cherkasy State Technological University*. 2023. Vol. 28, No. 4. P. 82–92. URL: <https://doi.org/10.62660/2306-4412.4.2023.82-90>
11. Ahn M. J., Chen Y.-C. (2022). Digital transformation toward AI- augmented public administration: The perception of government employees and the willingness to use AI in government. *Government Information Quarterly*. 2022. Vol. 39. No. 2. Article 101664. URL: <https://doi.org/10.1016/j.giq.2021.101664> (accessed 22 January 2024).
12. Sanina A., Balashov A., Rubtcova M. The socio-economic efficiency of digital government transformation. *International Journal of Public Administration*. 2021. Vol. 46. No. 1. P. 85–96. URL: <https://doi.org/10.1080/01900692.2021.1988637> (accessed 22 January 2024).
13. Mergel I., Dickinson H., Stenvall J., Gasco M. Implementing AI in the public sector. *Public Management Review*. 2023. P. 1–14. URL: <https://doi.org/10.1080/14719037.2023.2231950> (accessed 22 January 2024).
14. Medaglia R., Tangi L. The adoption of artificial intelligence in the public sector in Europe: Drivers, features, and impacts. *ICEGOV '22: Proceedings of the 15th International Conference on Theory and Practice of Electronic Governance*. New York: Association for Computing Machinery, 2022. <https://doi.org/10.1145/3560107.3560110> (accessed 22 January 2024).

Krymska A.O. THE KEY ROLE OF POLYGRAPH EXAMINATIONS IN INFORMATION SECURITY MANAGEMENT STRATEGIES IN ECONOMIC SECTORS

Polygraphs play an important role in providing an additional level of security and control of access to confidential information in various sectors of the economy. This is due to the need to reduce the risk of data leakage due to negligence or criminal activity, which can seriously damage the financial stability and reputation of enterprises. Polygraphic tests allow you to check the authenticity and reliability of personnel who have access to important information. This helps reduce the risk of data leakage and identify potential insider threats. The use of a polygraph allows you to assess the degree of trustworthiness of employees and their willingness to comply with internal information security policies. Polygraphic checks allow you to identify potential threats from within the organization. This includes detecting unauthorized access to confidential information and offenses that may occur in economic sectors where information security is critical to the financial stability and reputation of businesses. Polygraphy becomes a tool for preventing internal conflicts and cyber threats. In the face of growing cyber threats and domestic conflicts, polygraph checks are becoming an important part of risk management and homeland security. This helps to increase the level of internal discipline and reduce internal threats that may come from employee misconduct. The integration of polygraphic studies into the information security strategy allows enterprises to effectively protect their information and resources from internal threats. Polygraphic checks must be carried out in compliance with ethical standards and the rights of employees, so as not to violate their rights and freedoms. This includes the mandatory informing of employees about the verification procedure, obtaining their consent to conducting polygraphic examinations and maintaining the confidentiality of the data obtained. Polygraphy becomes a powerful tool in the general complex of measures to ensure information security of enterprises. It contributes to maintaining the financial stability of enterprises and strengthening their reputation.

Key words: information security, management strategies, economic security, polygraphology, cyber threats.

Левківський В.Л.

Державний університет «Житомирська політехніка»

Марчук Д.К.

Державний університет «Житомирська політехніка»

Панаріна І.В.

Державний університет «Житомирська політехніка»

Кузьменко О.В.

Державний університет «Житомирська політехніка»

МОДЕЛЮВАННЯ ТА ПРОГРАМНА РЕАЛІЗАЦІЯ ПІДСИСТЕМИ МОНІТОРИНГУ СТАНУ ЗДОРОВ'Я

Нові технології, такі як хмарні рішення, системи Інтернету речей, блокчейн та штучний інтелект, мають великий потенціал для вдосконалення медичної сфери. Цифровізація системи охорони здоров'я потребує постійного удосконалення, тому розробка нових інформаційних технологій різних напрямків є надзвичайно важливим завданням. Зростання потреби у віддаленому моніторингу та діагностуванні стану пацієнтів вимагає розвитку нових та вдосконалення існуючих моделей, методів та технологій для підвищення рівня інформованості лікарів про стан пацієнтів, покращення доступності та ефективності медичних послуг, обміну медичною інформацією та вдосконалення обробки та аналізу медичних даних. Постійне оновлення та розвиток медичних інформаційних систем є необхідними для забезпечення цих потреб. Метою даної роботи є розробка веб-орієнтованої підсистеми для моніторингу стану здоров'я. Дана підсистема використовує технологію для збору даних, пов'язаних із фізіологічними параметрами людини, рівнями активності та іншою важливою інформацією про стан здоров'я. На етапі моделювання підсистеми були визначені основні ролі - адміністратор та зареєстрований користувач. Складено перелік основних функціональних можливостей, розподілених за відповідними ролями. Описано та проілюстровано діаграми варіантів використання, активностей і послідовностей. Спроектовано об'єктно-орієнтовану структуру програми, яка представлена у вигляді діаграми класів. Здійснено підбір технологій для програмної реалізації підсистеми - стек LAMP та PHP-фреймворк Yii2. Підсистема може бути використана як один із модулів у складі комплексної медичної інформаційної системи. Дані системи стають все більш поширеними, змінюючи наш підхід до охорони здоров'я та пропагуючи більш проактивний та персоналізований підхід до управління станом здоров'я.

Ключові слова: алгоритм, моніторинг, лікар, пацієнт, медична інформаційна система, МІС.

Постановка проблеми. Останні події на території України стимулюють пошук нових рішень для поліпшення процесів цифрової трансформації в сфері охорони здоров'я. Пандемія Covid-19 та російське вторгнення показують необхідність прискорення цифровізації медичного сектору. Проте, щоб підвищити ефективність системи охорони здоров'я, необхідні нові підходи, такі як покращення інформованості лікаря про стан пацієнтів, стандартизація медичної документації, оптимізація збору первинних даних та забезпечення більшої доступності медичних послуг [1].

Останнім часом стає все більш поширеним використання телемедицини, включаючи телемедичне консультування, моніторинг і проведення медичних процедур за допомогою віддалених

технологій. Використання мобільних додатків для збирання даних, реєстрації пацієнтів та інших завдань стало особливо актуальним під час пандемії та вторгнення. Впровадження електронних систем охорони здоров'я в Україні дозволило централізувати зберігання даних, покращити облік і уніфікацію документів, а також поліпшити якість управління і моніторингу. Хоча використання сучасних інформаційно-комунікаційних технологій в охороні здоров'я не є новиною, технічні, організаційні та нормативні аспекти потребують постійного вдосконалення.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. У роботі [2] автори виконали порівняльний аналіз кількох існуючих медичних інформаційних систем (МІС), дослідивши їхню структуру та

можливості. Вони також описали роль МІС як ключового інструменту для зберігання медичних даних. Ковбасюк С.В. та співавтори [3] запропонували програмний додаток для моніторингу захворюваності на Covid-19, який призначений для збору та обробки статистичних даних про поширення коронавірусної інфекції. У роботі [4] була розроблена медична система, головною метою якої – оцінка стану серцево-судинної системи на основі регулярних показників та прогнозування ризику розвитку захворювання за шкалою SCORE. Автори роботи [5] розробили систему автоматизованого контролю цукрового діабету, використовуючи математичні моделі для розрахунку балансу «глюкоза-інсулін». Запропонований додаток має значний потенціал для покращення якості життя людей, які страждають на це захворювання. У роботі [6] було здійснено проектування алгоритмів функціонування системи віддаленої діагностики стану пацієнтів. В роботі описано сценарії використання основних ролей програмного продукту та наведено приклади можливих опитувальних аркушів. Основна увага зосереджена на віддаленому консультуванні пацієнтів. Шматко О.В. та Сальніков С.С. описують модель децентралізованої системи для збору, зберігання та обміну електронними медичними картками. Запропонована модель не лише підвищує конфіденційність та цілісність медичних даних, але й суттєво покращує якість надання медичної допомоги та результати лікування пацієнтів [7]. Авторський колектив [8] дослідив проблему діагностики на основі даних пацієнта. Для вирішення цього завдання запропоновано використовувати підходи та методи штучних нейронних мереж. Вагомий внесок у розвиток медичних інформаційних систем та цифровізацію охорони здоров'я зробили вітчизняні та зарубіжні автори. Дослідження показують, що наразі увага сконцентрована на створенні єдиного медико-інформаційного простору, розвитку інструментів співпраці між медичними закладами, і удосконаленні систем державного управління в цій сфері [9]. Аналіз функціональності сучасних медичних інформаційних систем України та світу показує відсутність можливості аналізу та прогнозувати розвитку хронічних захворювань та їх ускладнень та модулів для моніторингу поточного стану пацієнтів [10]. Тому є необхідність у подальшому розвитку та вдосконаленні таких систем.

Постановка завдання. Метою роботи є представлення дослідження щодо моделювання та програмної реалізації підсистеми моніторингу стану

здоров'я. Підсистема має забезпечувати моніторинг у реальному часі, збір даних для допомоги контролю стану власного здоров'я, також допомоги медичним працівникам приймати обґрунтовані рішення.

Виклад основного матеріалу дослідження. Для моделювання інформаційної підсистеми використовуємо інструменти, запропоновані мовою Unified Modeling Language (UML). Головними ролями підсистеми є адміністратор та користувач. Адміністратор (*Admin*) відповідає за керування системою та обліковими записами користувачів. *Admin* може виконувати такі дії, як керування користувачами, створення або зміна облікових записів користувачів, надання або скасування прав адміністратора іншим користувачам, а також внесення та перегляд даних про стан здоров'я користувачів.

Користувач (*User*) представляє осіб, які бажають робити моніторинг власного здоров'я використовуючи програмний продукт. Вони можуть бути зареєстровані або адміністратором або самостійно. Користувачі можуть отримувати доступ до своїх особистих даних про здоров'я, оновлювати їх. Також користувачі можуть формувати власну групу серед інших користувачів (наприклад, членів родини), таким чином отримуючи можливість керувати даними про стан здоров'я членів своєї групи. Також користувачі мають можливість підтверджувати або скасовувати запити на додавання їх до групи іншого користувача, який відправив запит (рис. 1).

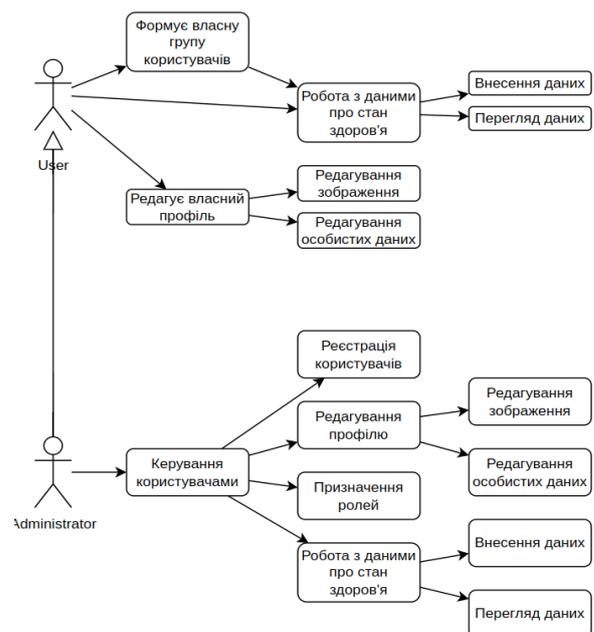


Рис. 1. Діаграма варіантів використання підсистеми моніторингу стану здоров'я

Опишемо алгоритми роботи основних ролей підсистеми. Користувачі підсистеми мають доступ до опції «Мій профіль», де є доступна особиста інформація користувача – ім'я, вік, контактна інформація та інші дані. Програма надає користувачеві інтерфейс для редагування бажаних полів: прізвище, ім'я, дата народження, фото. Після внесення необхідних змін користувач вибирає опцію «Зберегти зміни», щоб зберегти оновлену інформацію. Програма підтверджує, що зміни успішно збережені, і відображає повідомлення про те, що особисту інформацію оновлено.

Для заповнення даних про стан здоров'я можна скористатись опцією «Введення даних стану здоров'я», де є можливість ввести значення тиску, пульсу, рівня цукру в крові, температури. Програма надає різні форми для внесення даних. Підсистема надає користувачу можливості щодо перегляду історії різних показників стану здоров'я з можливістю сортування, пошуку і фільтрації даних, для цього необхідно обрати опцію «Перегляд даних про стан здоров'я».

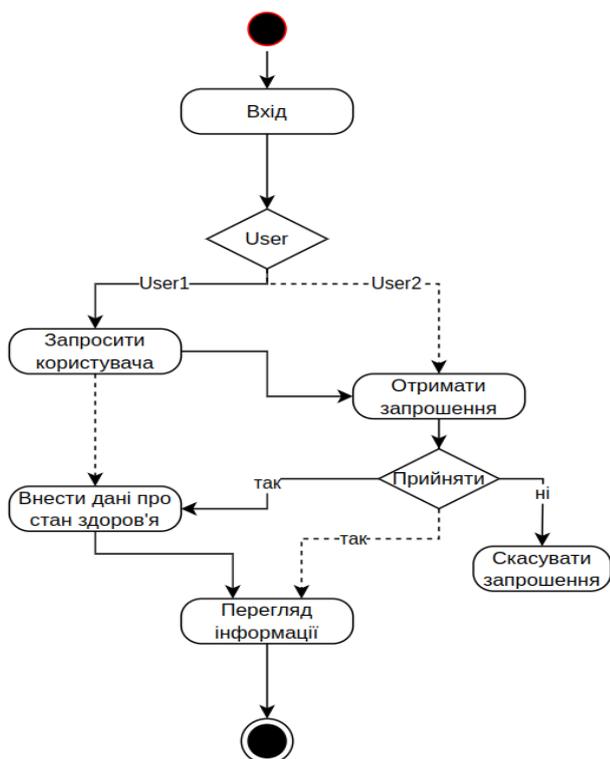


Рис. 2. Діаграма активності процесу додавання одним користувачем іншого до своєї групи для моніторингу стану здоров'я

Особливість даної підсистеми полягає в наданні можливості моніторингу власного здоров'я довірений особі. Це може бути корисно для людей досить похилого віку, коли є необхідність постій-

ного стороннього контролю. За надання відповідного доступу, довірена особа може зі свого профілю контролювати не лише власні показники здоров'я, а і іншої особи, яка надала на це згоду. В даному дослідженні опишемо можливість використання даної функції, не зачіпаючи глибоко питання безпеки, звичайно ж всі користувачі системи мають бути авторизованими.

Для додавання іншої особи (іншого користувача), потрібно натиснути на кнопку «Додати користувача у мою групу», програма відобразить форму з внесення логіну іншого користувача. Необхідно ввести потрібний логін і натиснути кнопку «Запросити». Користувач, якого запросили, в своєму кабінеті в списку «Мої запрошення», отримає запрошення та прийме або скасує його. Після прийняття запрошення, користувач, що надав запит, може вносити та переглядати дані про стан здоров'я іншого користувача (рис. 2).

Діаграма послідовності ілюструє процес взаємодії користувачів із системою при додаванні іншого користувача у власну групу для здійснення моніторингу стану здоров'я (наприклад, користувач може формувати групу з членів своєї сім'ї) (рис. 3).

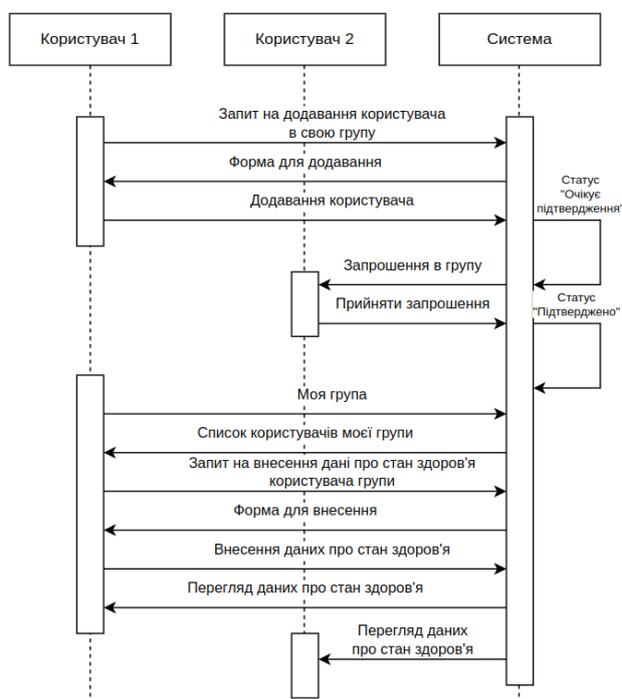


Рис. 3. Діаграма послідовності додавання іншого користувача у власну групу для можливості моніторингу стану здоров'я

На діаграмі (див. рис. 3) можемо спостерігати як Користувач 1 надсилає запит на додавання Користувача 2 в свою групу. Отримавши запит

програма надсилає користувачу 1 форму для додавання користувача 2 в групу. Користувач 1 вводить логін Користувача 2 і натискає кнопку «Відправити запрошення». Програма отримує запит та додає його до бази даних зі статусом «Очікує підтвердження». Користувач 2 отримує запрошення на вступ до групи у вкладці «Мої запрошення». Користувач 2 підтверджує або скасовує запрошення; в подальшому він може вийти з групи. Користувач 1 переглядає список своєї групи, може вносити дані різних показників стану здоров'я для користувачів своєї групи. Користувач 1 і Користувач 2 можуть переглядати історію різних показників стану здоров'я Користувача 2.

Програмна реалізація підсистеми передбачає використання об'єктно-орієнтованого підходу. Спроектовано основні класи, які представлено на діаграмі (рис. 4). Діаграма складається із основних сутностей та їх відношень: користувачі, показники стану здоров'я: артеріальний тиск, пульс, рівень цукру тощо.

Клас User – працює з даними зареєстрованих користувачів: реєстрація, автентифікація, вхід, робота з профілем користувача.

Клас Admin – наслідується від User. Має можливості щодо перегляду/редагування/видалення профілів та роботою з даними про стан здоров'я усіх користувачів.

Клас GroupUser – призначений для роботи з даними про групи користувачів. Кожен користувач може формувати власну групу користувачів, надсилаючи їм запрошення. Таким чином, він стає менеджером цих користувачів з можливостями перегляду їх профілю та роботи з даними про стан їх здоров'я.

Клас HealthData – базовий клас для зберігання спільних даних про стан здоров'я: пацієнт (для якого ввели дані), менеджер (хто ввів дані), дата і час вимірювання.

Класи BloodPressure, BloodSugar, Temperature – дані про конкретні показники стану здоров'я. На основі цих даних формується історія та можливість генерації статистики та звітної інформації.

В якості інструментів для реалізації програмної частини було обрано стек технологій LAMP

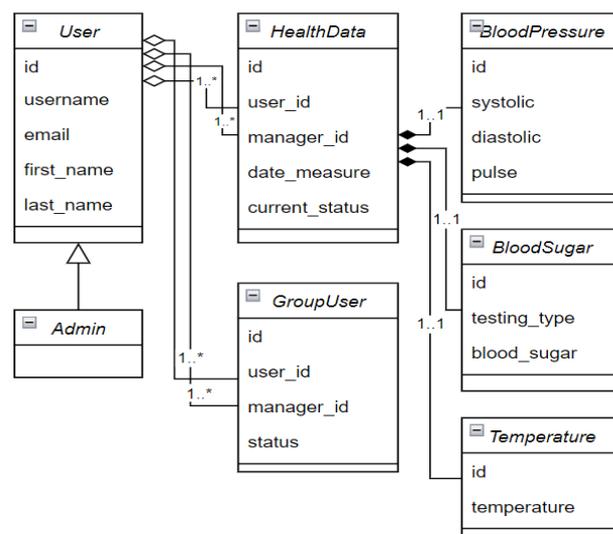


Рис. 4. Діаграма класів підсистеми моніторингу стану здоров'я

(Linux, Apache, MySQL, PHP) та PHP-фреймворк Yii2 враховуючи такі вимоги як економічна ефективність, безпека, надійність, швидкість розробки, гнучкість, масштабованість, документація та активна підтримка спільноти розробників.

Висновки. В даній статті було представлено результати моделювання та програмної реалізації підсистеми моніторингу стану здоров'я. На етапі проектування системи визначено варіанти використання для адміністраторів та зареєстрованих користувачів, наведено перелік основних функціональних можливостей, розподілених по відповідних ролях. Здійснено опис та проілюстровано діаграми варіантів використання, активностей, послідовностей. Спроектовано об'єктно-орієнтовану структуру програми та представлено у вигляді діаграми класів. Здійснено підбір технологій для програмної реалізації підсистеми.

Підсистема може бути використана як один з модулів в складі медичної інформаційної системи. У подальшому, дана реалізація може бути розширена шляхом впровадження нового функціоналу та розширення наявного. Завдяки обраній архітектурі масштабування програми відбуватиметься значно швидше.

Список літератури:

1. Розпорядження Кабінету Міністрів України «Про схвалення Концепції розвитку електронної охорони здоров'я». 2020. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1671-2020-%D1%80#Text> (дата звернення 15.04.2024).
2. Плєскач В.Л., Панасюк О.І. Особливості побудови медичної інформаційної системи для поліклініки. *Сучасні електромеханічні та інформаційні системи*: монографія / за заг. ред. І. В. Панасюка. Київ : КНУТД, 2021. С. 61-89.

3. Ковбасюк С.В., Легенчук С.Ф., Янчук В.О., Раєва С.Л. Інформаційна технологія обробки та візуалізації статистичних даних захворюваності на COVID-19. *Технічна інженерія*, № 2(92) 2023. С. 113-117.
4. Легенчук С.Ф., Ковбасюк С.В., Моргун А.М. Інформаційна технологія діагностування стану серцево-судинної системи людини. *Науковий журнал Вісник Хмельницького національного університету Серія: «Технічні науки»*. №5 т.2 2023 (325). С. 60-65.
5. Levkivskiy, V., Marchuk, G., Kuzmenko, O., Levchenko, A. The System of Automated Diabetes Control. Proceedings of the 5th Workshop for Young Scientists in Computer Science and Software Engineering - CS&SE@SW. SciTePress. 2023. pages 41-49. DOI: 10.5220/0012009500003561
6. Левківський В.Л. Функціональні алгоритми роботи віддаленої системи діагностування стану пацієнтів. *Технічна інженерія*, № 2(92) 2023. С. 118-124.
7. Шматко О.В., Сальніков С.С. Модель децентралізованої системи обміну електричними медичними картками на основі технології блокчейн. *Системи управління, навігації та зв'язку*. Збірник наукових праць. – Полтава: ПНТУ, 2024. – Т. 2 (76). – С. 155-162. – DOI: <https://doi.org/10.26906/SUNZ.2024.2.155>.
8. Leoshchenko S., Subbotin S., Oliinyk A., Lytvyn V., Ilyashenko M. Smart Crossover Mechanism for Parallel Neuroevolution Method of Medical Diagnostic Models Synthesis. 3rd International Workshop on Computer Modeling and Intelligent Systems. Volume 2608, 2020, Pages 57-69.
9. Левківський В.Л. Аналіз структури та функціональних можливостей медичних інформаційних систем України. *Вісник Херсонського національного технічного університету*. № 3(86), 2023. С. 111-118. DOI: <https://doi.org/10.35546/kntu2078-4481.2023.3.14>
10. Левківський В. Л. Моделі та методи обробки даних системи віддаленого моніторингу стану пацієнтів з цукровим діабетом: дис. д-ра філософії в галузі техн. наук : 121. Житомир, 2023. 218 с.

Levkivskiy V.L., Marchuk D.K., Panarina I.V., Kuzmenko A.V. MODELING AND SOFTWARE IMPLEMENTATION OF A HEALTH MONITORING SUBSYSTEM

Emerging technologies such as cloud solutions, the Internet of Things systems, blockchain, and artificial intelligence hold significant potential for enhancing the medical field. The digitalization of healthcare requires continuous improvement, making the development of new information technologies across various directions a critically important task. The growing need for remote monitoring and diagnosis of patients' health conditions necessitates the advancement of new models, methods, and technologies, as well as the improvement of existing ones, to increase physicians' awareness of patients' health, enhance the accessibility and efficiency of medical services, facilitate the exchange of medical information, and improve the processing and analysis of medical data. The continuous updating and development of medical information systems are essential to meet these needs. The aim of this work is to develop a web-oriented subsystem for health monitoring. This subsystem utilizes technology to collect data related to human physiological parameters, activity levels, and other important health-related information. During the modeling phase of the subsystem, key roles – administrator and registered user, were identified. A list of key functional capabilities distributed across these roles was compiled. Diagrams of use cases, activities, and sequences were described and illustrated. An object-oriented structure of the program was designed and presented as a class diagram. Technologies for the software implementation of the subsystem were selected, specifically the LAMP stack and the Yii2 PHP framework. The subsystem can be used as a module within a comprehensive medical information system. These systems are becoming increasingly widespread, transforming our approach to healthcare and promoting a more proactive and personalized approach to health management.

Key words: algorithm, monitoring, doctor, patient, medical information system, MIS.

Легеза В.П.Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»**Нещадим О.М.**Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

ДВОХФАКТОРНИЙ КРИТЕРІЙ ОПТИМІЗАЦІЇ І ЙОГО РЕАЛІЗАЦІЯ В ЗАДАЧІ ПРО БРАХІСТОХРОНУ НА ТРАНСЦЕНДЕНТНІЙ ПОВЕРХНІ

Розглядається варіаційна задача щодо пошуку оптимальної кривої руху матеріальної точки на трансцендентній поверхні, яка представляє собою горизонтальний циліндр, напрямною якого є циклоїда. Матеріальна точка рухається по поверхні без тертя і без початкової швидкості у вертикальному однорідному полі тяжіння. Відмінність від попередніх постановок варіаційних задач полягає в тому, що пошук екстремальної кривої ґрунтується на використанні двохфакторного критерію оптимізації замість мінімізації лише одного класичного функціоналу часу. Запропонований критерій полягає у мінімізації добутку функціоналу часу руху матеріальної точки та функціоналу довжини екстремальної кривої, вздовж якої здійснюється рух точки. Така постановка задачі пов'язана з тим, що зазвичай брахістохрона, яка є результатом розв'язку варіаційної задачі в класичній постановці як екстремаль мінімуму лише функціоналу часу, в деяких практичних логістичних задачах має достатньо велику довжину. Сформульовано відповідну ізопериметричну задачу, яка була розв'язана числовими методами. На основі її розв'язання з використанням двохфакторного критерію $Q(\lambda)$ отримано оптимальний розв'язок задачі про брахістохрону на трансцендентній поверхні. Розв'язок представлено в замкненій формі (для одної з координат – в квадратурах) у вигляді системи трьох параметричних рівнянь, які алгебраїчно описують брахістохронні криві на трансцендентній поверхні. Пошук екстремалей звівся до звичайного встановлення мінімуму критеріальної функції $Q(\lambda)$ в залежності від значень параметра λ . Числовими методами встановлено, що графік залежності величини критерію $Q(\lambda)$ від параметра λ має явно виражений локальний мінімум, який й дозволив знайти єдине компромісне значення параметра λ_E . Числовий аналіз підтвердив ефективність використання запропонованого критерію: для оптимальної за цим критерієм траєкторії час руху точки вздовж неї лише на 0,49 % більше, ніж для класичної брахістохрони на трансцендентній поверхні, проте довжина цієї кривої виявляється меншою за довжину класичної брахістохрони на 1,1 %.

Ключові слова: двохфакторний критерій оптимізації, функціонал часу, функціонал довжини, брахістохрона, трансцендентна поверхня, циклоїда, ізопериметрична задача.

Постановка проблеми. Розроблення нового методологічного підходу щодо використання двохфакторного критерію оптимізації в рамках розв'язання задачі про брахістохрону пов'язано з тим, що за певних обставин важливо в першу чергу зменшити її довжину S , ніж за будь яку ціну мінімізувати час руху T вздовж неї. Наприклад, при прокладанні тунелів метро, трамвайних, автобусних і троллейбусних шляхів або інших логістичних маршрутів (з періодичними зупинками) іноді краще суттєво зменшити об'єми робіт по облаштуванню і обслуговуванню шляхів руху транспортних засобів за рахунок несуттєвого збільшення часу руху вздовж таких маршрутів.

Отже, постановка задачі про пошук найкращого компромісу між двома факторами T і S ,

який можна визначити шляхом побудови та аналізу адекватного комплексного критерію оптимізації, виявляється цілком плідним. Очевидно, що для досягнення максимальної ефективності траєкторії має сенс відшукати найкращий відносний компроміс між величинами T і S , врахувавши їх функціональний взаємозв'язок. Для цього розглянемо двохфакторний критерій оптимізації у вигляді добутку окремих частинних критеріїв щодо функціоналу довжини S та функціоналу часу T [23]:

$$Q = T \cdot S \rightarrow \min_{\Lambda}, \quad (1)$$

де Λ – шукана просторова екстремальна крива.

Мультиплікативний критерій оптимізації (1) дозволяє оцінити, наскільки необхідно збіль-

шити час T руху матеріальної точки по шуканій кривій, щоб одночасно домогтися найбільшого зменшення її довжини S по відношенню до збільшення часу T . Саме це мається на увазі під найкращим відносним компромісом між зазначеними факторами.

Одразу зазначимо, що одночасна і окрема мінімізація обох функціоналів T і S не має сенсу, оскільки вони визначаються різними виразами та набувають своїх мінімальних значень на різних екстремалях.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Наведемо критичний аналіз наукових досліджень, які проведено в рамках пошуку рівнянь брахістохрони в різних постановках задач.

Уперше задачу про брахістохрону поставив і дослідив І. Бернуллі [1]. У 1696 р. він сформулював «проблему брахістохрони» в такій постановці: знайти форму кривої, рухаючись вздовж якої намистинка, що перебувала в початковий момент у стані спокою і яка прискорюється гравітацією, переміститься з одної заданої точки в іншу за мінімальний час. У цій задачі припускалося, що намистинка рухається без тертя у вертикальній площині під дією однорідного гравітаційного поля. І. Ньютон, В. Лейбніц, Г.Ф. Лопіталь, Я. Бернуллі, І. Бернуллі довели, що розв'язком цієї задачі є циклоїда [2]. Аналітичні розв'язки зазначеної «проблеми брахістохрони» з класичним використанням техніки варіаційного числення наведені у праці [3], а стосовно геометричної оптики – у [4]. Задачі про визначення форми брахістохрони з урахуванням сил кулонового тертя під час руху матеріальної точки у вертикальній площині в однорідному гравітаційному полі були досліджені Ashby та ін. [5], Heijden і Diepstraten [6]. У роботі Lipp [7] класична «проблема брахістохрони» Бернуллі з урахуванням сухого тертя представлена у термінах задачі теорії управління. В такій постановці задачі про брахістохрону параметром управління є похідна по часу від кута, який визначає напрямок руху матеріальної точки. Узагальнення задачі про пошук форми брахістохрони, яка лежить на циліндрі, з урахуванням кулонового тертя були виконані Covic і Vesković [8]. У роботах Hayen [9], В. Vratana і М. Saje [10] були сформульовані та розв'язані задачі про визначення форми брахістохрони у неконсервативних силових полях. Задача щодо визначення форми брахістохрони на циліндрі в однорідних силових полях була розв'язана в [11], а на циліндрах і сферах – у дисертації Palmieri [12]. Узагальнення задачі про брахістохрону на неоднорідні силові поля були розглянуті в статтях Aravind [13], Denman [14] і Venezian [15], причому в останній роботі була розв'язана

задача про брахістохрону в лінійних радіальних силових полях. У роботах Denman [14], Parnovsky [16], Tee [17] встановлені розв'язки цієї ж задачі у радіальних полях із силовою залежністю, яка є обернено пропорційною квадрату відстані між взаємодіючими точками. Подальші узагальнення задачі про брахістохрону для матеріальної точки, в яких вивчалися релятивістські ефекти, викладені в працях Goldstein і Bender [18], Scarpello і Ritelli [19]. У праці [20] проблема брахістохрони розглядається на поверхнях обертання зі збереженням енергії. Для цього використовуються як класичні рівняння Ейлера–Лагранжа, так і метод, розроблений для розв'язання низки задач геометричної оптики про поширення світла. В цій статті також розглядається випадок руху матеріальної точки із релятивістськими швидкостями. У [21] наведено нове узагальнення задачі про брахістохрону, в якій необхідно встановити форму кривої, що забезпечує переміщення матеріальної точки в однорідному гравітаційному полі за найменший час між заданою (стартовою) точкою і заданою кривою або між двома заданими кривими. Тертя в цих задачах не враховується. Узагальнена проблема розв'язується із застосуванням варіацій до різних кінцевих точок (точок фінішу). Ці задачі стосуються області варіаційних задач з вільними граничними умовами. Нові узагальнення постановки задачі про брахістохрону пов'язані з коченням без ковзання тіла скінченних розмірів по різних поверхнях. Розв'язок задачі про брахістохрону для тіла скінченних розмірів, що кочиться по ній, був відомий Е. Rogers [22], проте строге доведення і вивід рівнянь брахістохрони для такої задачі в його роботі відсутні. У свідоцтві авторського права [23] було вперше представлено і описано новий комплексний критерій оптимізації, який пропонується застосувати в цій статті до пошуку брахістохрони на трансцендентній поверхні. Цей науковий твір імплементує двохфакторний критерій оптимізації щодо пошуку брахістохрони на похилій площині в однорідному вертикальному гравітаційному полі тяжіння. В роботі [24] знайдено брахістохрону для матеріальної точки, яка рухається на трансцендентній поверхні, утвореній циклоїдою, без тертя в однорідному вертикальному гравітаційному полі тяжіння. У статті [25] методами класичного варіаційного числення були отримані рівняння брахістохрони для важкого однорідного циліндра, який перекочується без ковзання по вгнутий циліндричній виїмці, а також доведено ізохронність коливань його центра мас. Л.Д. Акуленком у роботі [26] були виведені рівняння брахістохрони для важкого однорідного диска, який перекочується вздовж неї без ковзання. Динаміка руху вертикального диска

по горизонтальній площині без ковзання досліджувалась у роботі А. Obradovic та ін. [27]. У [28] розглядається флюїдодинамічний варіант класичної проблеми брахістохрони Бернуллі. Розглянуто задачу про брахістохрону, в якій матеріальна точка замінена порожнистим циліндром, заповненим в'язкою рідиною. Поставлено і розв'язано задачу про встановлення форми кривої, яка з'єднує дві задані точки і вздовж якої циліндр перекоотиться за мінімальний час. Показано, що в загальному випадку шукана крива помітно відхиляється від циклоїди.

Підсумовуючи результати наведеного огляду літературних джерел, слід зазначити, що у всіх попередніх роботах використовувався класичний однофакторний критерій пошуку екстремалі, пов'язаний лише з мінімізацією часу T руху матеріальної точки вздовж шуканої кривої. Тому запропонований двофакторний критерій мінімізації добутку довжини кривої на час руху матеріальної точки вздовж неї дозволить встановити новий клас брахістохрон з властивостями, які мають очевидний практичний зміст.

Постановка завдання. Метою статті є створення і реалізація двофакторного критерію оптимізації (1) у вигляді добутку двох окремих функціоналів часу T і довжини S кривої руху матеріальної точки між двома заданими точками на трансцендентній поверхні. Зазначимо, що матеріальна точка рухається без тертя, без початкової швидкості і під дією однорідного вертикального поля тяжіння.

Виклад основного матеріалу дослідження. Побудова функціоналів часу T та довжини S . Встановлення формули комплексного критерію оптимізації для заданої поверхні. Введемо просторову систему координат $OXYZ$ так, як це показано на рис. 1.

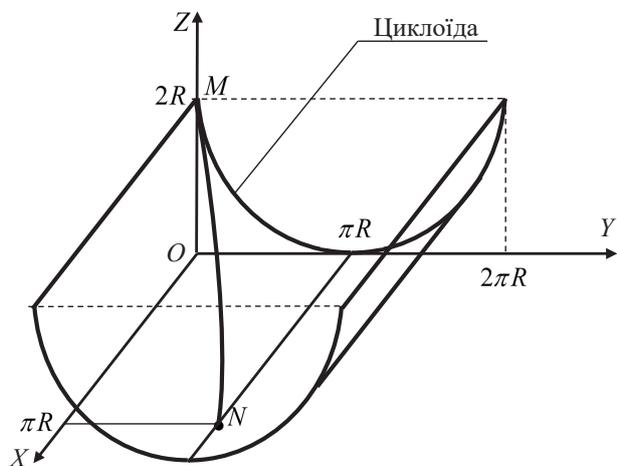


Рис. 1. Циліндрична поверхня, по якій без тертя рухається матеріальна точка

Матеріальна точка рухається по циліндричній поверхні, напрямною якої є циклоїда, а її твірні є паралельними осі OX . Параметричні рівняння заданої циклоїди визначаються двома координатами $y(\theta)$ (ордината) і $z(\theta)$ (апліката):

$$\begin{cases} y(\theta) = R(\theta - \sin \theta), \\ z(\theta) = R(1 + \cos \theta) \end{cases} \quad (2)$$

де θ – параметр циклоїди, $\theta \in [0, 2\pi]$, R – радіус твірного кола циклоїди.

Потрібно визначити залежність першої координати (абсциси) $x(\theta)$ від параметра θ так, щоб просторова траєкторія $\Lambda(x(\theta), y(\theta), z(\theta)) = MN$ (рис. 1) матеріальної точки забезпечувала би мінімум двофакторного критерію (1) за умови її переміщення по трансцендентній поверхні (2) з точки старту M у точку фінішу N . Нехай точки M і N мають такі координати: $M(x(0), y(0), z(0))$ – це стартова точка і $N(x(\pi), y(\pi), z(\pi))$ – фінішна точка. Якщо врахувати рівняння (2) та граничні умови для абсциси $x(0) = 0$, $x(\pi) = \pi R$, то координати точок старту і фінішу будуть такими: $M(0, 0, 2R)$ і $N(\pi R, \pi R, 0)$ (рис. 1).

Побудуємо **функціонал довжини S** на трансцендентній поверхні (2). Знайдемо диференціал дуги ds з урахуванням рівнянь голономної в'язі (2):

$$ds = \sqrt{(dx)^2 + (dy)^2 + (dz)^2} = \sqrt{1 + 4R^2 \sin^2\left(\frac{\theta}{2}\right)} (\theta'_x)^2 dx. \quad (3)$$

Функціонал довжини S руху визначається інтегруванням виразу (3):

$$S = \int_0^{x_f} ds = \int_0^{x_f} \sqrt{1 + 4R^2 \sin^2\left(\frac{\theta}{2}\right)} (\theta'_x)^2 dx, \quad (4)$$

де $x_f(\pi) = \pi R$ – абсциса матеріальної точки у фінішній точці N простору, що відповідає параметру $\theta = \pi$. Тепер виведемо формулу для **функціоналу часу T** . Оскільки матеріальна точка рухається по поверхні (2) без тертя, то система «матеріальна точка-поверхня» є консервативною. Побудуємо рівняння збереження енергії в нашій задачі:

$$mv^2/2 + mgz = h. \quad (5)$$

Визначимо константу h у співвідношенні (5) з урахуванням положення стартової точки $M(0, 0, 2R)$. В даному випадку у стартовій точці M початкова швидкість дорівнює нулю $v = 0$, а $z = 2R$. Отже, маємо вираз для h :

$$h = 2mgR.$$

Із співвідношення (5) отримаємо вираз для швидкості v руху матеріальної точки на трансцендентній поверхні (2):

$$v = \frac{ds}{dt} = \sqrt{2g} \cdot \sqrt{2R - z}. \quad (6)$$

Виразимо диференціал dt з рівняння (5) та запишемо функціонал часу T :

$$T = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{1}{gR}} \int_0^{x_f} \frac{\sqrt{1 + 4R^2 \sin^2(\theta/2)(\theta'_x)^2}}{\sin(\theta/2)} dx. \quad (7)$$

Розв’язання поставленої задачі. Визначення брахистохрони заданої довжини. Аналіз інтегральних кривих. Перш, ніж безпосередньо використовувати критерій (1), розглянемо допоміжну екстремальну задачу про знаходження брахистохрони заданої довжини, яка математично формулюється наступним чином:

$$T \rightarrow \min, \quad S = const. \quad (8)$$

Задача (8) є ізопериметричною задачею варіаційного числення, для вирішення якої необхідно скласти відповідну функцію Лагранжа, врахувавши функціонали (4) і (7) ([3, 29]):

$$L(\theta, \theta'_x) = \left(\lambda_1 + \frac{\lambda_0}{2\sqrt{gR}} \cdot \frac{1}{\sin(\theta/2)} \right) \cdot \sqrt{1 + 4R^2 \sin^2(\theta/2)(\theta'_x)^2}, \quad (9)$$

де λ_0, λ_1 – множники Лагранжа.

Далі розглядаємо задачу про екстремалі функціоналу з підінтегральною функцією $L(\theta, \theta'_x)$. Як і у варіаційній задачі про класичну брахистохрону, ця функція явно не залежить від x , тому для її розв’язання скористаємося першим інтегралом рівняння Ейлера – Лагранжа:

$$L - \theta'_x \cdot \frac{\partial L}{\partial \theta'_x} = C_0. \quad (10)$$

Після підстановки (9) в (10) дістанемо диференціальне рівняння:

$$\left(\lambda + \frac{1}{2\sqrt{gR}} \cdot \sin^{-1}\left(\frac{\theta}{2}\right) \right) = C \cdot \sqrt{1 + 4R^2 \sin^2\left(\frac{\theta}{2}\right)(\theta'_x)^2}, \quad (11)$$

де $C = C_0/\lambda_0$ – нова довільна стала; $\lambda = \lambda_1/\lambda_0$ – певний параметр ($\lambda_0 \neq 0$). Відмінність цієї задачі від задачі про класичну брахистохрону полягає в тому, що довільна стала C в (11) залежить не тільки від граничної умови $x(\pi) = \pi R$, а й від параметра λ .

Отже, з рівняння (11) треба знайти функцію $x(\theta, \lambda)$, яка дасть можливість знайти параметричне представлення екстремальної просторової кривої Λ , яка лежить на поверхні (2). В явній формі цю залежність отримати не вдається, проте її можна отримати числовими методами.

Запишемо інтеграл, який визначає шукану функцію $x(\theta, \lambda)$:

$$x(\theta, \lambda) = 2RC \int_0^{\theta} \sin(\theta/2) \cdot \left[\left(\lambda + \frac{1}{2\sqrt{gR}} \cdot \frac{1}{\sin(\theta/2)} \right)^2 - C^2 \right]^{-1/2} d\theta. \quad (12)$$

Зазначимо, що перша гранична умова в стартовій точці M тут автоматично виконується, оскільки за умови $\theta = 0$ маємо $x(0) = 0$. Довільну сталу C

у виразі (12) будемо шукати числовими методами в залежності від величини параметра λ з використанням другої граничної умови $x(\pi) = \pi R$. Тобто, надаючи параметру λ різних значень з області визначення підкореневого виразу (12) будемо отримувати відповідні сталі C , які насправді є функціями параметра λ . В подальших числових експериментах покладемо величину радіуса R твірного кола циклоїди (2) рівною одиниці.

Отже, стали C для кожного значення λ знайдемо із трансцендентного рівняння

$$2RC \int_0^{\pi} \sin(\theta/2) \cdot \left[\left(\lambda + (2\sqrt{gR} \cdot \sin(\theta/2))^{-1} \right)^2 - C^2 \right]^{-1/2} d\theta = \pi R. \quad (13)$$

Наприклад, для випадку класичної брахистохрони (за умови $\lambda = 0$) після числового розв’язання рівняння (13) дістанемо: $C = 0,119$. Графік залежності $C = C(\lambda)$ наведено на рис. 2.

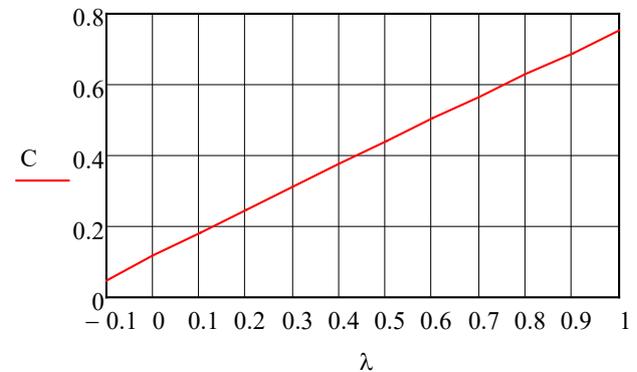


Рис. 2. Графік залежності $C = C(\lambda)$

Наведемо графіки низки інтегральних кривих $x(\theta, \lambda)$ для різних значень параметра λ за умови зміни параметра θ (рис. 3). Нагадаємо, що окрема крива $x(\theta, \lambda)$ є абсцисою брахистохрони екстремальної просторової кривої Λ . Нас будуть цікавити лише ті криві, які побудовані за умови $\lambda > 0$. Це пояснюється тим, що в усіх кривих за умови $\lambda < 0$ довжина S є більшою, ніж за $\lambda > 0$.

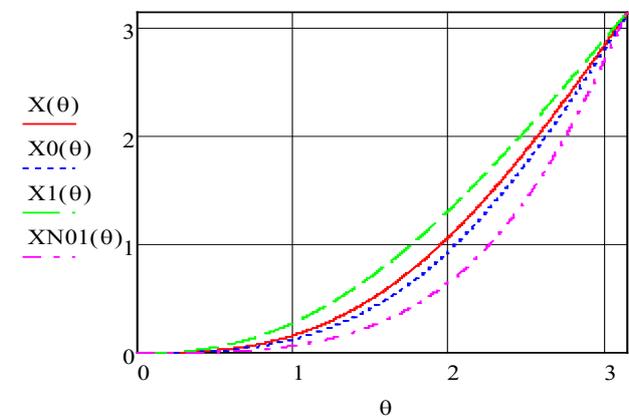


Рис. 3. Інтегральні криві $x(\theta, \lambda)$ для різних значень параметра λ

На рис. 3 позначено: $X(\theta)$ – інтегральна крива, побудована за умови $\lambda = 0,1$ (суцільна крива); $X_0(\theta)$ – інтегральна крива, побудована за умови $\lambda = 0$ (пунктирна лінія, це є абсциса класичної брахістохрони на трансцендентній поверхні (2)); $X_1(\theta)$ – інтегральна крива, побудована за умови $\lambda = 1$ (штрихова крива); $X_{N01}(\theta)$ – інтегральна крива, побудована за умови $\lambda = -0,1$ (штрихпунктирна лінія). З наведених кривих з очевидністю випливає, що їх довжини змінюються від найбільшої (у штрихпунктирної кривої) до найменшої – у штрихової кривої. При збільшенні параметра λ будь-яка інтегральна крива $x(\theta, \lambda)$, що з’єднує дві фіксовані точки M і N , буде лежати вище всіх попередніх.

Техніка обчислення величини двохфакторного критерію і його дослідження на екстремум. Для обчислення величини критерію (1) побудуємо відповідний добуток двох функціоналів (4) та (7), які перетворені для інтегрування за змінною θ . Цей вираз має такий вигляд:

$$Q(\lambda) = \sqrt{\frac{1}{4gR}} \int_0^{\theta_x} \frac{\sqrt{1 + 4R^2 \sin^2(\theta/2)(\theta'_x)^2}}{\sin(\theta/2) \cdot \theta'_x} d\theta \cdot \int_0^{\theta_x} \frac{\sqrt{1 + 4R^2 \sin^2(\theta/2)(\theta'_x)^2}}{\theta'_x} d\theta, \quad (14)$$

де похідна θ'_x обчислюється за формулою

$$\theta'_x = \sqrt{\left(\lambda + \frac{1}{2\sqrt{gR}} \cdot \frac{1}{\sin(\theta/2)} \right)^2 - C^2} / (2RC \sin(\theta/2))$$

для кожного значення параметра λ та відповідного йому значення сталої C .

Для знаходження мінімуму функції $Q = Q(\lambda)$ можна було би скористатись необхідною умовою існування екстремуму функції однієї змінної, проте це призводить до громіздких виразів, які складно аналізувати. Скористаємося графічно-числовим методом пошуку екстремуму функції $Q = Q(\lambda)$. Після проведення числового експерименту за формулою (14) наведемо графік залежності $Q = Q(\lambda)$ (рис. 4). На цьому графіку можна побачити, що він має чітко окреслений мінімум, який досягається за умови значення параметра $\lambda_E = 0,24$ (рис. 4). Це дозволяє отримати оптимальну за довжиною криву за умови певного компромісного зростання часу руху вздовж отриманої кривої. Числовий аналіз показав, що для обраного варіанту параметрів поверхні (2) і граничних умов (рис. 1) виграш у відстані складає близько 1,1%, а програш у часі дорівнює 0,49% порівняно з класичною брахістохроною. Для

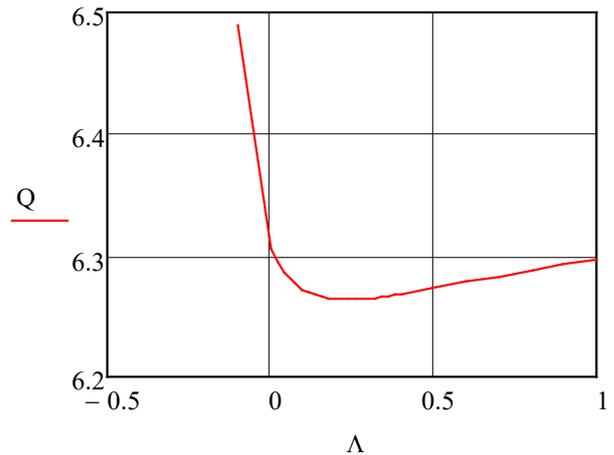


Рис. 4. Графік залежності критеріальної функції $Q = Q(\lambda)$ від параметра λ

інших поверхонь і граничних умов ці результати можуть бути більш значущими.

Висновки. В статті запропоновано новий методологічний підхід до постановки і розв’язання варіаційної задачі про брахістохрону на трансцендентній поверхні. В цьому підході враховується сумісна мінімізація добутку часу руху матеріальної точки та довжини кривої, вздовж якої здійснюється її брахістохронний рух. Така постановка задачі пов’язана з тим, що іноді важливо в першу чергу зменшити довжину кривої, ніж за будь яку ціну досягти на ній мінімуму часу руху.

Сформульовано відповідну ізопериметричну задачу, яку було розв’язано числовими методами. Розв’язок представлено в замкненій формі у вигляді системи параметричних рівнянь, які описують брахістохронні криві на трансцендентній поверхні. На основі розв’язання ізопериметричної задачі та з використанням двохфакторного критерію $Q(\lambda)$ отримано оптимальний розв’язок задачі про брахістохрону на трансцендентній поверхні. Встановлено, що графік залежності величини критерію $Q(\lambda)$ від параметра λ має явно виражений локальний мінімум, який дозволив знайти єдине компромісне значення параметра λ_E . Числовий аналіз підтвердив ефективність використання запропонованого критерію: для оптимальної за цим критерієм траєкторії час руху вздовж неї на 0,49 % більше, ніж для класичної брахістохрони, проте довжина цієї кривої виявляється меншою за довжину класичної брахістохрони на 1,1%.

Список літератури:

1. J. Bernoulli. Problema novum ad cuius solutionem mathematici invitantur, Acta Eruditorum, vol. 15, pp. 264–269, 1696.
2. W. Dunham, Journey Through Genius. New York: Penguin Books, 1991, 304 p.

3. I.M. Gelfand and S.V. Fomin. *Calculus of Variations*. Englewood Cliffs, NJ: Prentice-Hall, Inc., 1963, 232 p.
4. H. Erlichson, Johann Bernoulli's brachistochrone solution using Fermat's principle of least time, *Eur. J. Phys.*, vol. 20, no. 5, pp. 299–304, 1999. doi: 10.1088/0143-0807/20/5/301
5. N. Ashby et al. Brachistochrone with Coulomb friction, *Am. J. Phys.*, vol. 43, no. 10, pp. 902–906, 1975. doi: 10.1119/1.9976
6. A.M.A. van der Heijden and J.D. Diepstraten. On the brachistochrone with dry friction, *Int. J. Non-Linear Mechanics*, vol. 10, no. 2, pp. 97–112, 1975. doi: 10.1016/0020-7462(75)90017-7
7. S. Lipp. Brachistochrone with Coulomb friction, *SIAM J. Control Optim.*, vol. 35, no. 2, pp. 562–584, 1997. doi: 10.1137/S0363012995287957
8. V. Covic and M. Veskovic. Brachistochrone on a surface with Coulomb friction, *Int. J. Non-Linear Mechanics*, vol. 43, no. 5, pp. 437–450, 2008. doi: 10.1016/j.ijnonlinmec.2008.02.004
9. J.C. Hayen. Brachistochrone with Coulomb friction, *Int. J. Non-Linear Mechanics*, vol. 40, no. 8, pp. 1057–1075, 2005. doi: 10.1016/j.ijnonlinmec.2005.02.004
10. B. Vratinar and M. Saje. On analytical solution of the brachistochrone problem in a non-conservative field, *Int. J. Non-Linear Mechanics*, vol. 33, no. 3, pp. 489–505, 1998. doi: 10.1016/S0020-7462(97)00026-7
11. H.A. Yamani and A.A. Mulhem. A cylindrical variation on the brachistochrone problem, *Am. J. Phys.*, vol. 56, no. 5, pp. 467–469, 1988. doi: 10.1119/1.15755
12. D. Palmieri. The brachistochrone problem, a new twist to an old problem, Undergraduate Honors Thesis, Millersville University of PA, 1996.
13. P.K. Aravind. Simplified approach to brachistochrone problem, *Am. J. Phys.*, vol. 49, no. 9, pp. 884–886, 1981. doi: 10.1119/1.12389
14. H.H. Denman. Remarks on brachistochrone-tautochrone problem, *Am. J. Phys.*, vol. 53, no. 3, pp. 224–227, 1985. doi: 10.1119/1.14125
15. G. Venezian. Terrestrial brachistochrone, *Am. J. Phys.*, vol. 34, no. 8, p. 701, 1966. doi: 10.1119/1.1973207
16. A.S. Parnovsky. Some generalisations of the brachistochrone problem, *Acta Physica Polonica, A 93 Supplement*, pp. 5–55, 1998.
17. G. Tee. Isochrones and brachistochrones, *Neural, Parallel Sci. Comput.*, vol. 7, pp. 311–342, 1999.
18. H.F. Goldstein and C.M. Bender. Relativistic brachistochrone, *J. Math. Phys.*, vol. 27, no. 2, pp. 507–511, 1986.
19. G.M. Scarpello and D. Ritelli. Relativistic brachistochrone under electric or gravitational uniform field, *Z. Angew. Math. Mech.*, vol. 86, no. 9, pp. 736–743, 2006. doi: 10.1002/zamm.200510279
20. J. Gemmer et al. Generalizations of the brachistochrone problem, *Pi Mu Epsilon J.*, vol. 13, no. 4, pp. 207–218, 2011.
21. S. Mertens and S. Mingramm. Brachistochrones with loose ends, *Eur. J. Phys.*, vol. 29, pp. 1191–1199, 2008. doi: 10.1088/0143-0807/29/6/008
22. E. Rodgers. Brachistochrone and tautochrone curves for rolling bodies, *Am. J. Phys.*, vol. 14, pp. 249–252, 1946. doi: 10.1119/1.1990827
23. Legeza V.P. et al. Complex optimization criterion and its implementation in the brachistochron problem. Copyright certificate for a scientific work No. 126810, issued by the "Ukrainian National Office of Intellectual Property and Innovation" on 27.05. 2024 (in Ukrainian).
24. Legeza V. P. Brachistochronic motion of a material point on a transcendental surface // *International Applied Mechanics*. 2020. Vol. 56. No. 3. Pp. 358–366.
25. Legeza V.P. Brachistochrone for a Rolling Cylinder // *Mechanics of Solids*, 2010, 45(1): 27–33. DOI: 10.3103/S002565441001005X
26. L.D. Akulenko. The brachistochrone problem for a disk. *J. Appl. Math. Mech.*, vol. 73, no. 4, pp. 371–378, 2009. doi: 10.1016/j.jappmathmech.2009.08.015
27. A. Obradovic et al. The brachistochronic motion of a vertical disk rolling on a horizontal plane without slip. *Theor. Appl. Mech.*, vol. 44, no. 2, pp. 237–254, 2017. doi: 10.2298/TAM171002015O
28. S.S. Gurram et al. On the brachistochrone of a fluid-filled cylinder. *J. Fluid Mech.*, vol. 865, pp. 775–789, 2019. doi: 10.1017/jfm.2019.70
29. L.P. Eltsgolts, *Differential Equations and Variational Calculus*. University Press of the Pacific, 29.12. 2003 p. 444 p. ISBN-10:1410210677

Legeza V.P., Neshchadym O.M. A TWO-FACTOR OPTIMIZATION CRITERION AND ITS IMPLEMENTATION IN THE PROBLEM ABOUT BRACHISTOHRON ON A TRANSCENDENT SURFACE

The variational problem of finding the optimal curve of movement of a material point on the transcendental surface, which is a horizontal cylinder whose guide is a cycloid, is considered. A material point moves along a surface without friction and without initial velocity in a vertical uniform gravity field. The difference from the previous formulation of variational problems is that the search for the extreme curve is based on the use of a two-factor optimization criterion instead of the minimization of only one classical functional of time. The proposed criterion consists in minimizing the product of the functional of the time of movement of a material point and the functional of the length of the extreme curve along which the point moves. This formulation of the problem is connected with the fact that usually the brachistochron, which is the result of the solution of the variational problem in the classical formulation as the extremum of the minimum of only the time functional, has a sufficiently large length in some practical logistic problems. A corresponding isoperimetric problem was formulated, which was solved by numerical methods. On the basis of its solution using the two-factor criterion $Q(\lambda)$, the optimal solution of the brachistochron problem on the transcendental surface was obtained. The solution is presented in a closed form (for one of the coordinates – in quadratures) in the form of a system of three parametric equations that algebraically describe the brachistochron curves on the transcendental surface. The search for extremals came down to the usual setting of the minimum of the criterion function $Q(\lambda)$ depending on the parameter values λ . Using numerical methods, it was established that the graph of the dependence of the value of the criterion $Q(\lambda)$ on the parameter λ has a clearly expressed local minimum, which made it possible to find a single compromise value of the parameter λ_E . Numerical analysis confirmed the effectiveness of using the proposed criterion: for a trajectory optimal according to this criterion, the point movement time along it is only 0.49% longer than for a classical brachistochrone on a transcendental surface, but the length of this curve turns out to be 1.1% shorter than the length of a classical brachistochrone.

Key words: two-factor optimization criterion, time functional, length functional, brachistochrone, transcendental surface, cycloid, isoperimetric problem.

УДК 629.33

DOI <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2024.4/21>

Лисенко О.І.

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

Тачинина О.М.

Національний авіаційний університет

Фуртат С.О.

Таврійський національний університет імені В.І. Вернадського

Фуртат О.В.

Таврійський національний університет імені В.І. Вернадського

Галай О.Ф.

Таврійський національний університет імені В.І. Вернадського

МЕТОДИКА АЛГОРИТМІЧНОЇ МОДЕРНІЗАЦІЇ ЦИФРОВИХ ЕЛЕКТРОПРИВОДІВ МЕХАТРОННИХ ПРИСТРОЇВ МАЛОЇ ЦИВІЛЬНОЇ АВІАЦІЇ

Стаття присвячена викладу методики алгоритмічної модернізації цифрових електроприводів мехатронних обладнань малої цивільної авіації.

Мета статті заключається в зменшенні часу перехідного процесу в каналі управління кутовою швидкістю обертання ротора електропривода, поліпшення показників квазіінваріантності по відношенню до зовнішньої обурюючої дії.

Авіаційна електромеханіка малої цивільної авіації активно модернізується завдяки використанню цифрових мехатронних пристроїв. Кількість цифрових електроприводів мехатронних пристроїв на борту «літального джипа» перевищує декілька сотень. Апаратна модернізація практично досягла свого переділу. Істотно збільшити швидкість і надійність цифрових електроприводів мехатронних пристроїв, зменшити масогабаритні показники та енергоспоживання можна тільки завдяки алгоритмічній модернізації. Для сегменту малої цивільної авіації, яка використовує тільки електричну енергію або гібридні джерела енергії, вкрай важливо не бути енерговитратною. Мала цивільна авіація управляється на 80% не професіоналами, а любителями (аналогічно легковому автомобільному транспорту). Для малої цивільної авіації має первинне значення підвищення безпеки польотів. З цієї причини алгоритмічна модернізація цифрових електроприводів мехатронних обладнань малої цивільної авіації, спрямована на підвищення надійності цих пристроїв шляхом заміни механічних датчиків на алгоритмічні (спостерігачі стану), зменшення (у межі зведення до нуля) запізнення в механізмах оброблення сигналів управління є актуальним.

В результаті отримано зменшення амплітуди сплеску швидкості обертання ротора, викликаного зовнішнім обуренням, і тривалістю цього сплеску, мінімізація додаткових витрати енергії, які викликані алгоритмічною корекцією динамічних характеристик електроприводу, поліпшення експлуатаційних характеристик електроприводу, підвищення надійності і зменшення масогабаритних характеристик електроприводу завдяки заміні механічного вимірювача швидкості обертання ротора на алгоритмічний.

Стаття вносить істотний внесок у розвиток перспективних інженерних методик проектування нових і модернізації існуючих цифрових систем управління електроприводами мехатронних обладнань малої цивільної авіації.

Ключові слова: цифрове автоматичне управління електроприводом, моделювання в просторі станів, корекція динамічних характеристик електроприводів.

Постановка проблеми. Авіаційна електромеханіка малої цивільної авіації активно модернізується завдяки використанню цифрових мехатронних пристроїв. Кількість цифрових

електроприводів мехатронних пристроїв на борту «літального джипа» перевищує декілька сотень. Апаратна модернізація практично досягла свого переділу. Істотно збільшити швидкість і надій-

ність цифрових електроприводів мехатронних пристроїв, зменшити масогабаритні показники та енергоспоживання можна тільки завдяки алгоритмічній модернізації. Для сегменту малої цивільної авіації, яка використовує тільки електричну енергію або гібридні джерела енергії, вкрай важливо не бути енерговитратною. Мала цивільна авіація управляється на 80% не професіоналами, а любителями (аналогічно легковому автомобільному транспорту). Для малої цивільної авіації має первинне значення підвищення безпеки польотів. З цієї причини алгоритмічна модернізація цифрових електроприводів мехатронних обладнань малої цивільної авіації, спрямована на підвищення надійності цих пристроїв шляхом заміни механічних датчиків на алгоритмічні (спостерігачі стану), зменшення (у межі зведення до нуля) запізнення в механізмах оброблення сигналів управління є актуальним.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Мета дослідження: нині, цифрове управління електроприводами мехатронних обладнань малої цивільної авіації здійснюється, у кращому разі, цифровими ПД-регуляторами. Ці ПД-регулятори параметрично налаштовуються на математичні моделі під час проведення періодичних регламентних робіт або за запитом пілота, або за результатами аналізу записів об'єктивного контролю. Алгоритмічна корекція динамічних характеристик електроприводу не виконується. Для виміру кутової швидкості обертання ротора або кута повороту ротора електроприводу використовуються спеціальні механічні сенсори (датчики первинної інформації), які не мають досить високої надійності і, при цьому, збільшують масу електроприводу. Таким чином, актуальним є завдання розробки методики алгоритмічної модернізації цифрового електроприводу мехатронних обладнань малої цивільної авіації.

Об'єкт дослідження: розглянемо управління швидкістю обертання одного з 24 гвинтів повітряного двомісного літака вертолітного типу.

Предмет дослідження: перехідний процес в каналі управління гвинтом, поліпшення показників квазіінваріантності по відношенню до зовнішньої обурюючої дії (зменшити амплітуду сплеску швидкості обертання гвинта, викликаного зовнішнім обуренням, і тривалість цього сплеску); мінімізувати додаткові витрати енергії, які викликані алгоритмічною корекцією динамічних характеристик електроприводу гвинта; підвищити експлуатаційні характеристики електроприводу гвинта (завдяки заміні механічного

вимірника швидкості обертання гвинта на алгоритмічний).

Постановка завдання.

Хід роботи:

1. Вибір вихідної структури цифрової системи автоматичного керування в якості прототипу (ЦСАК-прототип) для подальшої модернізації.

2. Параметрична оптимізація ЦСАК-прототипу за обраним критерієм.

3. Корекція динамічних властивостей (характеристик) об'єкту керування (побудова внутрішнього корегуючого контуру).

4. Параметрична оптимізація модернізованого ЦСАК, тобто ЦСАК-прототипу з об'єктом керування із скорегованими динамічними властивостями.

5. Синтез спостерігача Льюїнбергера та його підключення до зовнішнього контуру ЦСАК-прототипу та внутрішнього і зовнішнього контурів модернізованого ЦСАК.

6. Обчислювальний експеримент стосовно оцінки якості функціонування ЦСАК із спостерігачем Льюїнбергера.

7. Висновки.

Виклад основного матеріалу. У якості ЦСАК-прототипу обираємо систему, що складається із двигуна постійного струму (ДПС) та ЦПД-регулятора. ДПС обертає несучий гвинт. Такого типу ЦСАК є найуживанішими в мехатронних системах малої цивільної авіації. ЦСАК із ЦПД-регулятором має властивість астатизму першого порядку.

В якості математичної моделі безперервного об'єкту управління, яким є двигун постійного струму, розглядається безперервна МІМО ЛПІ (багатовимірна стаціонарна) математична модель. Кількісні значення параметрів безперервної математичної моделі ДПС вказані на мал. 1 (див. блок 4). Вхідними сигналами блоку 4 являються: напруга підводиться до якоря ДПС (управління по ланцюгу якоря), яке подається з виходу ЦПД-регулятора (блок 3), і гальмівний момент, який подається з блоку 2. Вихідними сигналами блоку 4 являються: струм якоря $i(t)$ і кутова швидкість обертання якоря(ротора) ДПС $w(t)$. Для виміру $w(t)$ в ЦСАК-прототипі використовується спеціальний сенсор(механічний датчик первинної інформації, яким є тахогенератор.

Налаштування ЦПД-регулятора (пошук значень його параметрів близьких до оптимальних) може бути виконано із використанням будь якого із методів чисельної оптимізації. У запропонованій методиці, на даному етапі і в подальшому,

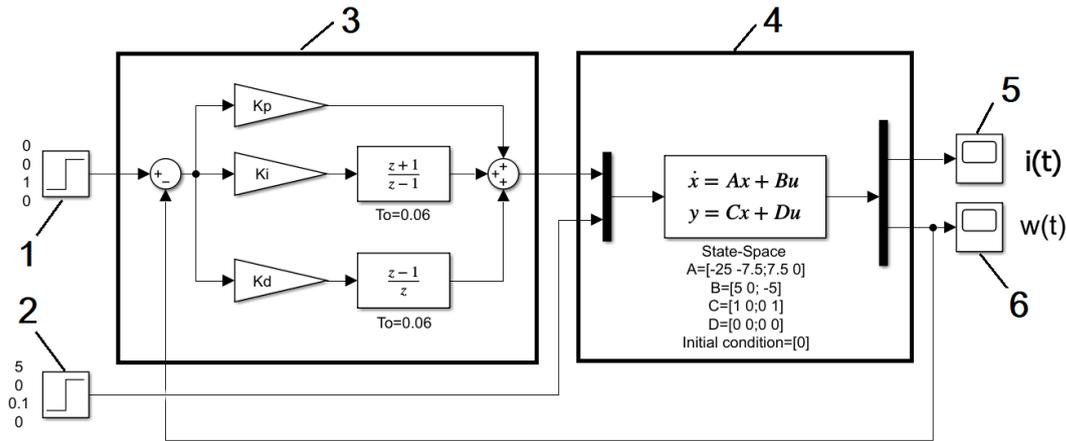


Рис. 1. Комп'ютерна математична модель ЦСАК-прототипу

1 – керуючий сигнал, який задає значення кутової швидкості обертання ротора ДПС і подається на перший керуючий вхід; 2 – збурення, що діє на іншому керуючому вході; 3 – цифровий пропорційно-інтегрально-диференціальний регулятор; 4 – неперервний об'єкт керування (двигун постійного струму (ДПС)); 5, 6 – осцилографи для спостереження зміни в часі відповідно струму якоря ДПС $i(t)$ та кутової швидкості обертання ротора (якорі) ДПС $w(t)$

було обрано критерієм оптимальності година тривалості перехідного процесу, який потрібно мінімізувати; застосовано метод чисельної оптимізації, який має назву метод Хука-Дживса; знайдено перше наближення до оптимальних значень параметрів ЦПД-регулятора методом Зіглера-Ніколса. Аналіз перехідного процесу в каналі керування кутовою швидкістю обертання якоря(ротора) ДПС підтверджує відомий факт, що процес є аперіодичним та ЦСАК-прототип має астатизм першого порядку.

Завдяки використанню внутрішнього контуру зворотного зв'язку забезпечити задані значення коренів характеристичного рівняння для математичної моделі внутрішнього контуру ЦСАК ДПС.

Як відомо, метод модального регулювання дозволяє знайти значення елементів матричного коефіцієнту зворотного зв'язку Km , при яких корені характеристичного рівняння для математичної моделі внутрішнього контуру ЦСАК ДПС будуть дорівнювати наперед заданим значенням.

Алгоритм корекції складається із трьох послідовно діючих алгоритмів. Перший – алгоритм модального аналізу (АМА). АМА перетворює реальні виміри вихідних координат вектору стану об'єкту керування у віртуальні виміри в уявному просторі завдяки застосуванню матриці лінійного перетворення T .

Другий – алгоритм модального регулювання (АМР). АМР обчислює віртуальний вектор керування із використанням матричного коефіцієнту підсилення Kmr .

Третій – алгоритм модального синтезу (АМС).

АМС обчислює реальний вектор керування із використанням матричного коефіцієнта підсилення Kms .

Таким чином $K32=Kms \cdot Kmr \cdot T$.

Обчислимо, Kmr , Kms , $K32$ із використанням функцій системи комп'ютерної математики MATLAB+Simulink(припустимо, що бажані значення коренів характеристичного рівняння для математичної моделі внутрішнього контуру ЦСАК ДПС дорівнюють 0.5): $[V, L]=\text{eig}(A)$; $T=\text{inv}(V)$; $Kmr=L \cdot [0.5 \ 0; 0 \ 0.5]$; $Kms=\text{inv}(T \cdot B)$.

У результаті розрахунків отримано:

$$V=[-0.9487 \ 0.3163; 0.3163 \ -0.9487];$$

$$L=[0.2593 \ 0; 0 \ 0.8607];$$

$$T=[-1.1860 \ -0.3955; -0.3955 \ -1.1860];$$

$$Kmr=[-0.2407 \ 0; 0 \ 0.3607];$$

$$Kms=\text{inv}(T \cdot B)=[-5.7616 \ 1.1356; -1.9215 \ 3.4057];$$

$$K32=[-1.8068 \ -1.0343; -1.0344 \ -1.6399].$$

Корекція динамічних властивостей об'єкта керування методом лінійного квадратичного регулювання стану.

Завдяки використанню внутрішнього контуру зворотного зв'язку виконати таку корекцію динамічних властивостей об'єкта керування методом лінійного квадратичного регулювання стану, при якій квадратичний критерій якості

$$J = x^T(N) \cdot Q \cdot x(N) + \sum_{n=0}^{N-1} (x^T(n) \cdot Q \cdot x(n) + u^T(n) \cdot R \cdot u(n)),$$

досягає свого найменшого значення при переводі системи

$$x(n+1) = A \cdot x(n) + B \cdot u(n)$$

із початкового стану $x(0)$ у кінцевий стан $x(N)$ де матриці Q, R – симетричні і відповідно додатньо-напіввизначені та додатньовизначені

Будуємо квазіоптимальний регулятор із сталим матричним коефіцієнтом підсилення [20]:

$$u(n) = -K_0 \cdot x(n),$$

де $K_0 = (R + B^T \cdot P_0 \cdot B)^{-1} \cdot B^T \cdot P_0 \cdot A$;

$$P_0 = \lim_{N \rightarrow \infty} P(N - j) \Leftrightarrow$$

$$\Leftrightarrow P_0 = Q + A^T \cdot P_0 \cdot (I - B \cdot (B^T \cdot P_0 \cdot B + R)^{-1} \cdot B^T \cdot P_0) \cdot A.$$

Задаємо матриці

$$A = [0.1841 \ -0.2256; 0.2256 \ 0.9359];$$

$$B = [0.1504 \ 0.04274; 0.04274 \ -0.2928];$$

$Q = [1 \ 0; 0 \ 1]$; $R = [0.7 \ 0; 0 \ 0.3]$ та за допомогою функції `dlqr` системи комп'ютерної математики MATLAB+Simulink обчислюємо сталі значення матричного коефіцієнта підсилення лінійного квадратичного регулятора K_0 та матрицю P_0 :

$$[K_0, P_0] = \text{dlqr}(A, B, Q, R);$$

$$P_0 = [1.1215 \ 0.2625; 0.2625 \ 2.1414];$$

$$K_{33} = K_0 = [0.0731 \ 0.0623; -0.2964 \ -1.1854].$$

У результаті отримано наступні значення параметрів ЦПД-регуляторів для кожного із варіантів корекції динамічних властивостей об'єкта керування:

Корекція динамічних властивостей об'єкта керування методом регулювання стану із бажаним(заданим) характеристичним рівнянням:

$$K_{p41} = 5; K_{i41} = 0.8; K_{d41} = 2.47.$$

Корекція динамічних властивостей об'єкта керування методом модального регулювання стану:

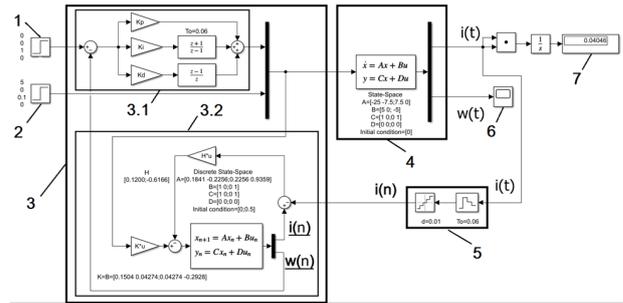
$$K_{p42} = 18; K_{i42} = 5.5; K_{d42} = 2.25.$$

Корекція динамічних властивостей об'єкта керування методом лінійного квадратичного регулювання стану:

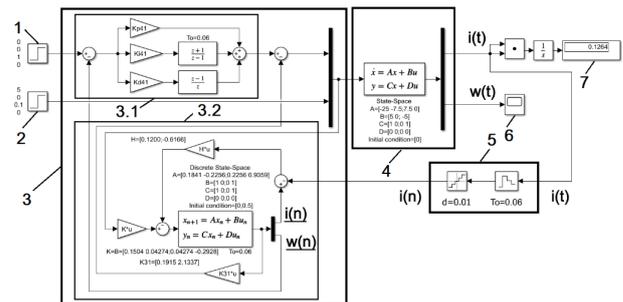
$$K_{p43} = 18; K_{i43} = 5; K_{d43} = 5.62.$$

Модернізованими будемо називати ЦСАК, у яких виконана корекція динамічних властивостей ДПС та налаштовані параметри ЦПД-регуляторів за критерієм мінімального години тривалості перехідного процесу у двоконтурній ЦСАК ДПС.

Виконаємо підключення спостерігача Льюїнбергера до комп'ютерних математичних моделей ЦСАК-прототипу та модернізованих ЦСАК.



Комп'ютерна математична модель підключення спостерігача Льюїнбергера до ЦСАК-прототипу.



По фізичному сенсу процесів, що відбуваються в електроприводі, зрозуміло, що досягти підвищення інтенсивності переходу об'єкта управління з одного стану в інший можна тільки за рахунок додаткових витрат енергії. Порівняльний аналіз значень величини Q для досліджених варіантів алгоритмічної корекції динамічних характеристик ДПС підтверджує цей факт. З цієї причини пропонується з усіх варіантів модернізації вважати найкращим той, для реалізації якого додаткові витрати енергії будуть найменшими.

Позитивним є те, що алгоритмічний вимір кутової швидкості обертання ротора ДПС за допомогою спостерігача Льюїнбергера дозволяє зменшити вагу і габарити ЦСАК і підвищити її надійність. Поліпшення пояснюється відмовою від використання механічного тахогенератора в ланцюзі зворотного зв'язку ЦСАК. Для виміру струму в ланцюзі якоря ДПС пропонується використати малогабаритний цифровий сенсор, який має набагато меншу вагу і габарити в порівнянні з тахогенератором і більш високою надійністю. Цифровий сенсор струму подає інформацію на вхід спостерігача Льюїнбергера, для функціонування якого має бути відома досить «груба» МІМО ЛГІ математична модель ДПС.

Висновки. Рекомендація до практичного застосування результатів досліджень, викладених у цій статті полягає в наступному. В процесі функціонування об'єкта, на якому встановлюється привід гвинта, що розглядається в статті, виділити два режими: номінальний і форсований. У номінальному режимі використати ЦСАК-прототип з під-

ключенням спостерігача Льюїнбергера до алгоритму ПД-регулятора. У форсованому режимі використати модернізовану ЦСАК із корекцією динамічних властивостей об'єкта керування методом регулювання стану із бажаним (заданим) характеристичним рівнянням та підключенням спостерігача Льюїнбергера.

Використання запропонованих рекомендацій дозволить досягти поставлених в статті цілей: поліпшити динамічні характеристики електроприводу мехатронного пристрою при незначному збільшенні витрат енергії; підвищити надійність і зменшити масогабаритні показники електроприводу.

Список літератури:

1. Lundstrom, D.: Aircraft Design Automation and Subscale Testing – With Special Reference to Micro Air Vehicles. Linköping Studies in Science and Technology, Dissertations No. 1480(2012), URL: <https://www.diva-portal.org/smash/get/diva2:561097/FULLTEXT01.pdf>.
2. Gudmundsson, S.: General Aviation Aircraft Design : Applied Methods and Procedures. Butterworth – Heinemann(2021).
3. Lundstrom, D., Amadori, K., Krus, P.: Distributed Framework for Micro Aerial Vehicle Design Automation. In: 46th AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit, Reno, Nevada, pp. 1-10. Reston, Virginia(2008). URL: <https://doi.org/10.2514/6.2008-140>.
4. Dantsker, O., Imtiaz, S., Caccamo, M.: Electric Propulsion System Optimization for Long – Endurance and Solar – Powered Unmanned Aircraft. In: AIAA Propulsion and Energy 2019 Forum, Indianapolis, IN, pp. 1-11. Reston, Virginia(2019). URL: <https://doi.org/10.2514/6.2019-4486>.
5. Dantsker, O., Theile, M., Caccamo, M.: A High – Fidelity, Low – Order Propulsion Power Model for Fixed – Wing Electric Unmanned Aircraft. In: 2018 AIAA/IEEE Electric Aircraft Technologies Symposium, Cincinnati, Ohio, pp. 1-14. Reston, Virginia(2018). URL: <https://doi.org/10.2514/6.2018-5009>.
6. Sforza, P.: Commercial Airplane Design Principles. Elsevier Science & Technology Books. Elsevier, Oxford(2014).
7. Amadori, K., Lundström, D., Krus, P.: Automated design and fabrication of micro – air vehicles. J. Aerosp. Eng. 226(10), 1271-1282. SAGE Publications Inc., London(2011), URL: <https://doi.org/10.1177/0954410011419612>.
8. Sforza, P.: Manned Spacecraft Design Principles. Elsevier Science & Technology Books. Elsevier, Oxford(2015).
9. Aliofkhaezrai, M., Makhlouf, A. S. H.: Handbook of Materials Failure Analysis with Case Studies from the Aerospace and Automotive Industries. Elsevier Science & Technology Books. Elsevier, Oxford(2015).
10. Lundström, D., Amadori, K., Krus, P.: Automation of Design and Prototyping of Micro Aerial Vehicle. In 47th AIAA Aerospace Sciences Meeting including The New Horizons Forum and Aerospace Exposition(pp. 1-16). Reston, Virginia: American Institute of Aeronautics and Astronautics(2009), URL: <https://doi.org/10.2514/6.2009-629>.
11. Moir, I., Seabridge, A.: Design and Development of Aircraft Systems. John Wiley & Sons, Ltd, Chichester, UK(2012). URL: <https://doi.org/10.1002/9781118469156>.
12. Lysenko, O., Tachynina, O., Guida, O., Furtat, O., Furtat, S., Sushyn, I.: Engineering Methodology of Express Synthesis of Digital Automatic Control System for Precision Mechatronic Devices of Mobile Sensor Networks. In: Proceedings of Vernadsky National University of Crimea. Technical Sciences Series. Vol. 33(72), No. 5, pp. 11-19. Odessa, Ukraine: Helvetika Publishing(2022).
13. Lysenko, O., Tachynina, O., Ponomarenko, S., Guida O.: Optimal Branched Trajectories Theory. Igor Sikorsky KPI, Kyiv(2023). URL: <https://ela.kpi.ua/handle/123456789/52094>.
14. Hassanalian M., Abdelkefi A. Classifications, applications, and design challenges of drones: A review. Progress in Aerospace Sciences. 2017. Vol. 91. pp. 99-131. Elsevier, Oxford(2017).
15. Sforza, P.: Theory of Aerospace Propulsion. Elsevier Science & Technology Books, Oxford(2011).
16. Papageorgiou, A., Tarkian, M., Amadori, K., Olvander, J.: Multidisciplinary Design Optimization of Aerial Vehicles : A Review of Recent Advancements. International Journal of Aerospace Engineering, Vol. 2018, pp. 1-21. Hindawi Limited, London(2018), URL: <https://doi.org/10.1155/2018/4258020>.
17. Rajendran, S., Pagel, E.: Recommendations for emerging air taxi network operations based on online review analysis of helicopter services. Heliyon, 6(12), e05581. Cell Press, Cambridge(2020), URL: <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2020.e05581>.
18. Lysenko, O.: HANDONG UNITWIN FELLOWSHIP(Republic of Korea). Course [S084 – Ukraine] Mathematical programming and operations research in telecommunications, 14 Lectures. Fall 2017. URL: <https://www.hufocw.org/Course/263>.
19. Lysenko, O.: HANDONG UNITWIN FELLOWSHIP(Republic of Korea). Course «Digital automatic control systems for information communications engineers», 14 Lectures. Spring 2020. URL: <https://www.hufocw.org/Course/197>.
20. Graham C. Goodwin, Stefan F. Graebe, Mario E. Salgado.: Control System Design. Prentice Hall, Upper Saddle River, New Jersey 07458, 2001.

Lysenko O.I., Tachynyna O.M., Furtat S.O., Furtat O.V. METHODOLOGY OF ALGORITHMIC MODERNIZATION OF DIGITAL ELECTRIC DRIVES OF MECHATRONIC DEVICES OF SMALL CIVIL AVIATION

The article is devoted to the presentation of the method of algorithmic modernization of digital electric drives of mechatronic devices of small civil aviation.

The purpose of the article is to reduce the time of the transition process in the control channel of the angular velocity of rotation of the rotor of the electric drive, to improve the indicators of quasi-invariance in relation to the external disturbing action.

Aviation electromechanics of small civil aviation is being actively modernized due to the use of digital mechatronic devices. The number of digital electric drives of mechatronic devices on board the «flying jeep» exceeds several hundreds. Hardware modernization has practically reached its redistribution. It is possible to significantly increase the speed and reliability of digital electric drives of mechatronic devices, reduce weight and size indicators and energy consumption only thanks to algorithmic modernization. For the segment of small civil aviation that uses only electric energy or hybrid energy sources, it is extremely important not to be energy-intensive. 80% of small civil aviation is operated not by professionals, but by amateurs (similar to passenger car transport). For small civil aviation, increasing flight safety is of primary importance. For this reason, the algorithmic modernization of digital electric drives of mechatronic devices of small civil aviation, aimed at increasing the reliability of these devices by replacing mechanical sensors with algorithmic (state monitors), reducing (within the limit of reduction to zero) the delay in control signal processing mechanisms is relevant.

As a result, a reduction in the amplitude of the burst of rotor rotation speed caused by external disturbance and the duration of this burst, minimization of additional energy consumption caused by the algorithmic correction of the dynamic characteristics of the electric drive, improvement of the operational characteristics of the electric drive, increased reliability and reduction of the mass-dimensional characteristics of the electric drive thanks to the replacement of the mechanical speed meter were obtained rotor to algorithmic.

The article makes a significant contribution to the development of promising engineering methods for the design of new and modernization of existing digital control systems for electric drives of mechatronic devices of small civil aviation.

Key words: *digital automatic control of an electric drive, modeling in the space of states, correction of dynamic characteristics of electric drives.*

Oleshchenko L.M.

National Technical University of Ukraine “Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute”

Burchak P.V.

National Technical University of Ukraine “Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute”

SOFTWARE SYSTEM ARCHITECTURE DEVELOPMENT FOR INTELLIGENT ANALYSIS OF WEB APPLICATION PERFORMANCE METRICS

Today the number of web applications that process large amounts of data is increasing, which creates new challenges for developers and users. Web applications that handle big data are becoming an essential part of business, government, and everyday life, enhancing efficiency, accuracy, and speed of decision-making. This brings numerous problems, such as ensuring data security and confidentiality, efficient processing and storage of large volumes of information, and the need for continuous monitoring and optimization of web application performance. Resource management and energy efficiency are becoming particularly relevant in the context of energy savings. Solving these problems requires the use of the latest technologies, such as intelligent monitoring and analysis systems, which help ensure the stable and efficient operation of web applications in conditions of constantly increasing data volumes and task complexity. Addressing web application performance issues through intelligent monitoring systems will enable developers to quickly and accurately identify bottlenecks and optimize code, which in turn ensures a better user experience and reduces maintenance costs. Unresolved issues include the complexity of integrating new technologies into existing systems, the need to consider various factors affecting performance, and ensuring a high level of security and data confidentiality during monitoring.

The article analyzes existing software solutions such as Google Lighthouse, Apache JMeter, New Relic, Dynatrace, GTmetrix, Pingdom, AppDynamics, WebPage Test, Sentry, and LoadRunner, their functional capabilities, main advantages, and disadvantages. It examines the possibilities of using machine learning and artificial intelligence technologies in the considered software systems. Based on the analysis, a software system architecture is proposed for analyzing the performance of web applications written in JavaScript, which allows for the collection of numerical data on the factors affecting the performance of the web application, performing regression analysis to determine the assessment of the influence of factors, clustering and classification of the processed data for the correctness of the allocation of recommendations for developers, which must be used in order to improve the performance of the web application and reduce the load on the web server. According to the conducted research, the use of machine learning methods in software systems for web application performance analytics can increase the performance of web applications by an average of 20%.

Key words: software system architecture, web application performance evaluation, JavaScript, machine learning, AI, regression analysis, clustering, classification, neural networks.

Introduction. Problem Statement. Monitoring the performance of web applications is critical to ensuring the stable operation of software on the Internet. In modern realities, when saving resources becomes critically important, optimizing the performance of web applications allows to reduce the load on servers and infrastructure, which, in turn, contributes to reducing energy consumption. This is especially relevant for developers who work with the JavaScript language, as web applications in this programming language are extremely popular both in Ukraine and around the world. According to statistics, more than 70% of modern web applications use the JavaScript language for the development of the client part, a significant share

of server solutions is also based on Node.js. In Ukraine, this trend is supported by the wide implementation of web technologies in various industries, including the financial sector, education, e-commerce. Using machine learning (ML) techniques to evaluate the performance of web applications allows not only to identify bottlenecks and problems in the execution of the code, but also to predict potential performance problems, which allows to take early measures to eliminate them. The development of such a software system is not only relevant from a technical point of view, but also contributes to the overall efficiency of the use of resources, which is an important contribution to the preservation of the country's energy resources.

The main goal of the article is designing a software system architecture for intelligent analysis of the performance of web applications written in the JavaScript language.

Related research. In the article [1] authors analyze various techniques, including caching, compression, Content Delivery Networks (CDNs), and tools such as WebPageTest and YSlow. The research aims to help Web developers and performance engineers optimize their websites for improved search engine rankings.

The paper [2] presents a research on optimizing trace visualizations for microservices performance analysis. The authors investigate current limitations in trace visualization tools and propose novel techniques for effective performance analysis.

The research paper [3] explored the use of Dynatrace monitoring data to generate performance models for Java EE applications. The research aimed to improve the understanding and optimization of application performance by leveraging monitoring data and developing accurate performance models.

The research [4] investigates the process of storing and managing data in the client side of web applications, focusing on software methods for local state management, and demonstrates that using an atomic approach to data state management with the

React Context API reduces data processing time by 17% compared to popular libraries such as Redux, MobXState-Tree, and Recoil, thereby optimizing state management and improving overall performance.

Existing software solutions analysis

Google Lighthouse is an open source software tool that evaluates performance, accessibility, SEO and other aspects of web applications. Google Lighthouse performs automated audits to evaluate various indicators, works on the basis of Chrome DevTools (Fig. 1). Google Lighthouse specializes in client-side performance analysis, providing detailed reports on page rendering, load times, image optimization, resource size, and overall page speed.

Google Lighthouse has a limited ability to analyze server performance, it can provide general recommendations for download speed but does not provide in-depth analysis [5].

Apache JMeter is a powerful web application load testing and performance measurement tool that uses the Java language to create load scripts and can test various protocols, including HTTP, HTTPS, SOAP, FTP. JMeter is less suitable for analyzing client-side performance. The main application of the tool is server load and performance testing. JMeter is used for load testing servers, including web servers, APIs, and databases. The tool can create a heavy load for



| 3 Reduce JavaScript execution time | | 5.0 s ▲ ^ | |
|--|----------|-------------------|--------------|
| Consider reducing the time spent parsing, compiling, and executing JS. You may find delivering smaller JS payloads helps with this. Learn more . | | | |
| URL | Total | Script Evaluation | Script Parse |
| /flightselect_dist/polyfills.d042969....js (www.ryanair.com) | 2,303 ms | 2,155 ms | 5 ms |
| /flightselect_dist/6.000e012....js (www.ryanair.com) | 1,367 ms | 1,293 ms | 1 ms |
| /flightselect_dist/main.d618929....js (www.ryanair.com) | 874 ms | 868 ms | 6 ms |
| /flightselect_dist/common.f21c90b....js (www.ryanair.com) | 151 ms | 147 ms | 4 ms |

Fig. 1. Google Lighthouse monitoring results

testing the scalability and performance of the backend of a web application [6].

New Relic is a cloud platform for monitoring the performance of web applications in real-time. Uses agents integrated with server-side programming languages (Java, Python, Node.js, Ruby, etc.) to collect data. New Relic offers front-end performance monitoring tools, including Real User Metrics (RUM), which show how real users interact with a web application. New Relic provides deep back-end monitoring, including server, database, and infrastructure performance. This allows the identification of bottlenecks and performance problems on the server side [7].

Dynatrace is a commercial application performance monitoring tool, including a detailed analysis of each transaction, using AI to analyze performance, and agents to collect data from various system components. Dynatrace offers comprehensive client-side monitoring, including analysis of page load times, user interactions, and JavaScript performance metrics [8].

Dynatrace provides deep back-end analysis, including monitoring of servers, databases, microservices, and containers. AI algorithms help to automatically identify problems and causes of productivity decline (Fig. 2).

GTmetrix is a tool for analyzing the speed of loading web pages and providing detailed reports, which uses an API to receive data from Google Lighthouse and other sources. GTmetrix focuses on client-side performance analysis, using Lighthouse and PageSpeed tools to provide detailed reports on page rendering, resource loading, and optimization [9].

Pingdom is a tool for monitoring the availability and performance of websites. The software system

uses global servers for availability monitoring, and APIs for integration with other systems. Pingdom provides tools to monitor page load speed and client-side performance and uses real user data to evaluate user interaction with the web application. Pingdom does not specialize in backend analysis but only provides basic information about server availability and response time [10].

AppDynamics is a commercial application performance monitoring and user experience management platform that uses agents to collect metrics from various system components and analytical tools for data analysis. AppDynamics offers tools for monitoring client-side performance, including real-user metrics and JavaScript analysis. AppDynamics also provides deep back-end monitoring, including application, database, and infrastructure performance analysis. This allows for identifying bottlenecks and optimizing the client part of the software [11].

WebPageTest is an open-source tool for measuring web page performance, providing detailed reports, using browsers for testing and APIs for automation. WebPageTest specializes in analyzing the performance of the client side of a web application, offers detailed reports on page load times, resource optimization, and rendering, and has limited capabilities for analyzing server performance [12].

Sentry is a commercial platform that monitors errors and application performance. The advantage of this platform is integration with various programming languages and frameworks, and analysis of logs and metrics. Sentry provides front-end error and performance monitoring, including JavaScript analysis and real-time error tracking. Sentry also

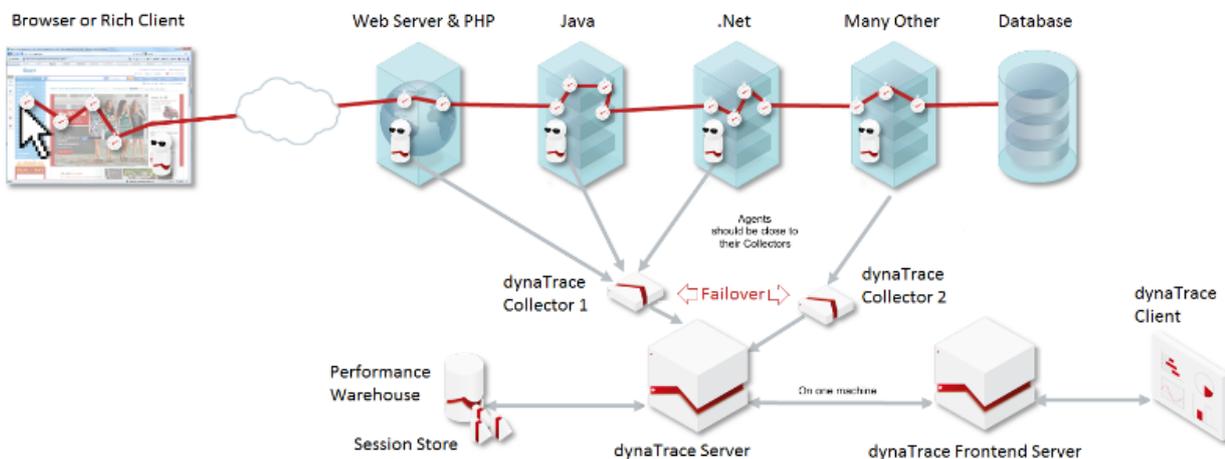


Fig. 2. Dynatrace monitoring process [8]

supports back-end monitoring, including server errors and back-end performance [13].

LoadRunner is a commercial load-testing tool created by Micro Focus that supports various protocols, and load scenarios based on real user actions. *LoadRunner* is less suitable for client-side performance analysis, and specializes in server load testing, providing scalable tests to determine server performance under heavy load [14].

Table 1 shows the capabilities of software systems to analyze the performance of client and server web applications written in JavaScript.

Google Lighthouse, GTmetrix, WebPageTest, and Pingdom are compatible with major browsers such as Chrome, Firefox, Safari, and Edge. Apache JMeter primarily tests web applications and APIs, not browser functionality.

New Relic and Dynatrace provide cross-browser compatibility for monitoring JavaScript errors and user interactions in Chrome, Firefox, Safari, and Edge. AppDynamics supports monitoring in all major browsers. Sentry integrates with most modern browsers, including Chrome, Firefox, Safari, and Edge, to catch JavaScript errors. *LoadRunner* focuses on performance testing and is compatible with web applications running in any browser, but does not provide browser-specific integration features.

Google Lighthouse relies on Chrome DevTools, limiting its integration flexibility with non-Chrome test environments. It may struggle with scalability for over 1,000 requests per minute and lacks support for large-scale distributed performance testing,

problematic for web applications with more than 100,000 daily requests.

Apache JMeter requires significant configuration, is challenging for beginners, and its interface slows with large test plans. Though it supports distributed testing, managing multiple instances can be cumbersome, and handling over 10,000 concurrent users can bottleneck memory usage.

New Relic's setup is complex, with proprietary limitations and high costs for over 500,000 daily requests, potentially leading to data processing limits. Dynatrace's complex setup and reliance on AI for analysis can obscure problem causes, with scalability issues due to high costs and significant data storage needs. GTmetrix's reliance on third-party tools limits customization, making it less suitable for large-scale testing of web applications with over 1 million daily requests.

Pingdom lacks deep server performance analysis and struggles with over 10,000 requests per second. AppDynamics offers comprehensive monitoring, but its high cost and decreased performance with over 1 TB of data per month limit its appeal to small and medium enterprises.

WebPageTest lacks server-side tools and becomes resource-intensive with large sites having over 1,000 elements per page. Sentry detects errors but can delay with over 50,000 events per minute.

LoadRunner, while powerful, is complex and expensive, and its performance degrades with over 1 million virtual users. As data volumes exceed 10 GB per day, performance bottlenecks require advanced

Table 1

Capabilities of software systems for analyzing the performance of the client and server part of web applications and their main limitations

| Software system | Analysis of the client part | Analysis of the server part | Disadvantages |
|-------------------|-----------------------------|-----------------------------|--|
| Google Lighthouse | + | - | May require expertise to interpret the results |
| Apache JMeter | - | + | Difficulty setting up requires knowledge of Java programming language |
| New Relic | + | + | High cost for large teams (from \$99/month for each host) |
| Dynatrace | + | + | High cost, complexity of configuration (from \$69/month for each host) |
| GTmetrix | + | - | Limitations of the free version (Pro plans from \$10/month) |
| Pingdom | + | - | High cost for advanced features (from \$15/month) |
| AppDynamics | + | + | High cost, complexity of setup (from \$330/month) |
| WebPageTest | + | - | Limited support for other protocols |
| Sentry | + | + | High cost for large teams (from \$29/month), limited functionality |
| LoadRunner | - | + | High cost, complexity of setting (from \$4000/year) |

data architectures like NoSQL, in-memory data grids, or cloud storage. Managing distributed components is challenging, necessitating robust orchestration and monitoring tools, and addressing network latency and data consistency issues is critical for maintaining system performance.

Using machine learning methods and AI to evaluate the performance of web applications

Google Lighthouse uses AI to analyze various web performance metrics and suggest specific improvements for optimization. For example, the system allows to identify resources that block rendering and recommend ways to postpone them, thus speeding up page load time. Regression analysis is used to predict the performance of web pages based on historical data.

Google Lighthouse automatically tests web pages and collects various performance metrics such as First Contentful Paint (FCP), Time to Interactive (TTI), Largest Contentful Paint (LCP), Cumulative Layout Shift (CLS) and others. For example, over the past month, the Lighthouse system tested the page 100 times and collected data on load time (FCP, TTI), size of downloaded resources, number of requests, etc. After collecting the data, Lighthouse applies regression analysis to identify patterns. For example, an analysis might show that increasing the size of images on a page by 1MB results in an increase in FCP load time of 200ms.

A regression model based on the collected data, where performance metrics are the dependent variables and factors such as image sizes, number of requests, file types, etc. are the independent variables. Based on the model, it is possible to predict the performance of web pages when certain parameters are changed. If we reduce the size of the images by 500KB, the model can show that the FCP load time will decrease by 100ms.

Web developers can use these predictions to optimize their pages. For example, they can decide to optimize images or reduce the number of HTTP requests based on predictions from regression analysis to improve overall page performance. Using regression analysis, Google Lighthouse can find that every additional 100KB of images adds 50ms to FCP's load time. Web developers can predict that reducing the total image size by 500KB can reduce FCP load times by 250ms. This provides concrete numbers to base optimization decisions on.

The use of regression analysis in Google Lighthouse allows not only to evaluate the current performance of web pages but also to predict how certain changes in the code and content will affect

these indicators, which makes the optimization process more scientific and justified.

Random Forest in Google Lighthouse is used to classify and evaluate the impact of various factors on page performance. A random forest is an ensemble ML method consisting of many decision trees. Each tree is trained on different subsets of data and subsets of features, which allows the model to be resistant to overtraining and more accurate in general cases. A random forest models the relationship between a dependent variable (performance measures such as First Contentful Paint, Time to Interactive) and independent variables (factors affecting performance such as image size, number of HTTP requests, and script loading time).

Lighthouse collects data about web page performance, including performance metrics and the factors that influence them. For example, data about FCP, image size, number of requests, and loading time of scripts for 1000 web pages is collected. The data are divided into training and test samples. Prepared data can look like a table, where rows represent web pages and columns represent performance metrics and factors.

A random forest is trained on the training sample. For example, 100 decision trees are created, where each tree is trained on a random subset of the data. A random forest model classifies and evaluates the impact of various factors on performance.

For example, the model might show that image size has the greatest impact on FCP, with an importance score of 0.45, number of requests at 0.30, and script load time at 0.25. The model uses a trained random forest to predict the performance of new web pages. For a web page with an image size of 1800 KB, a request count of 55, and a script load time of 1200 ms, the model predicts an FCP of 1600 ms.

Random Forest helps developers understand which factors most affect the performance of their web pages and predict how changes in those factors will affect performance metrics. This allows to make informed decisions to optimize and improve the speed of web applications.

GTmetrix uses ML algorithms to predict how changes to a website might affect its speed and user interaction.

Gradient boosting is used to more accurately determine the factors that affect the performance of web pages. Gradient boosting is an ensemble ML technique that builds a model by successively adding weak models (such as decision trees) in such a way that each successive model tries to correct the errors of the previous one. GTmetrix collects web page

performance data, including performance metrics (eg Page Load Time, First Contentful Paint) and factors that affect them (eg image size, number of HTTP requests, script load time).

Gradient boosting in GTmetrix allows to accurately determine which factors have the greatest impact on web page performance. For example, if image size turns out to be the most important factor, developers can focus on optimizing images to improve page load times.

Classification is used to rank pages by performance and identify critical areas. GTmetrix uses various classification methods to analyze and rank web page performance, such as Decision Trees, Random Forest, and Support Vector Machine (SVM). Decision trees are used to identify the most important factors affecting web page performance. This helps to quickly identify bottlenecks and areas that need optimization. A random forest improves the accuracy of predictions by combining the results of many decision trees. This provides more reliable and stable performance analysis results.

WebPageTest uses artificial intelligence (AI) to simulate various network conditions and user interactions, providing a more comprehensive analysis. Neural networks are used for complex analysis of the influence of various parameters on the performance of web pages.

Pingdom uses AI to continuously monitor website uptime and performance. The system can automatically alert users to performance issues and suggest potential fixes based on historical data patterns. If the server is often slow at a certain time, Pingdom can predict this and notify the user in advance. Time series analysis is used to predict downtime and website availability issues. Using ML techniques such as autocorrelation and moving averages, the system can detect patterns and anomalies in time series data. This allows Pingdom to predict potential downtime and availability issues, providing users with warnings and recommendations to avoid them. Logistic regression is used to identify the probability of problems based on historical data. The system analyzes various parameters such as response time, number of requests, throughput, and other performance indicators to estimate the probability of failures or downtime. Logistic regression can be used to create models that predict the risk of problems based on input data.

Apache JMeter mainly focuses on load and performance testing of web applications and APIs. By integrating ML, JMeter can detect anomalies in performance data, such as unexpected spikes in response time, and automatically flag them for

further investigation. K-means clustering is used to group similar queries or transactions based on their performance and behavioral characteristics and to identify atypical test results that may indicate performance issues. When testing a web application, we can collect response time data for various requests. Using the K-means algorithm, these queries can be grouped into several clusters, such as fast, medium and slow queries. This allows to identify groups of requests that have similar performance and identify critical areas that need optimization.

New Relic uses AI and ML for predictive analytics and performance monitoring. The system can automatically detect performance bottlenecks and provide recommendations to optimize web application performance. For example, New Relic can analyze transaction traces to pinpoint slow queries and suggest methods for indexing or optimizing queries. Linear regression is used in New Relic to analyze trends in performance data to predict future problems.

Dynatrace uses AI for root cause analysis and predictive analytics. Its Davis AI engine automatically correlates performance data across the entire application stack, identifying the root cause of problems without manual intervention. For example, if a specific microservice is causing slowdowns, Davis AI can highlight it and suggest steps to fix it. Recurrent neural networks (RNNs) are used to analyze time series and predict server loads. Reinforcement learning uses automatic changes in system configurations.

AppDynamics uses AI anomaly detection to monitor application performance, can automatically detect deviations from normal behavior, and perform detailed diagnostics. For example, if a certain transaction starts taking longer than usual, AppDynamics can flag this and offer insight into whether the problem is in the database, server, or network. A decision tree is used to identify critical paths in code that affect performance. Anomaly detection is used to automatically detect deviations in system performance.

Sentry integrates ML to prioritize and cluster bugs, helping developers focus on the most critical issues. For example, Sentry can automatically group similar bugs together and rank them based on their impact, allowing developers to prioritize the most pressing issues. Clustering is used to group similar errors and identify the root causes of problems. For this, clustering methods such as K-means or Density-Based Spatial Clustering of Applications with Noise (DBSCAN) are used. K-means clustering helps identify groups of similar errors based on their characteristics, such as

error messages and call stacks. DBSCAN is used to detect high-density clusters in error data, allowing the detection of sporadic or rare errors that may have a significant impact on the system.

Deep learning in Sentry is used to automatically prioritize errors and their criticality. For example, RNNs can analyze a sequence of errors and identify patterns that allow predicting the probability of future failures. Convolutional Neural Networks (CNNs) can be applied to analyze logs and traces, automatically classifying errors according to their criticality. This allows developers quickly determine which errors have the greatest impact on the system.

LoadRunner uses AI to simulate realistic user behavior patterns and predict system performance under various loads. It can model complex user interactions and analyze how they affect system performance, helping to ensure that applications can handle real-world usage scenarios. Regression analysis is used to determine the effect of various factors on performance during stress tests. Anomaly detection is used to detect unexpected behaviors when testing a system under load.

Software system architecture designing for intelligent analysis of web application performance

In the research, we use regression analysis to predict the impact of changes on page performance. Regression analysis is used to predict the performance of web pages based on several independent variables.

The main independent variables include: **time to the first byte (Time to First Byte, TTFB)**, which is measured in milliseconds (ms) and indicates the time required by the server to respond; **the loading time of the first content image (First Contentful Paint, FCP)**, also measured in milliseconds (ms) and indicates when the first image or text appears on the screen; **speed index (Speed Index)**, which is measured in milliseconds (ms) and shows the speed of page content display; **the number of HTTP requests (Number of Requests)**, measured by the number of requests and indicating the total number of requests required to download all page resources; and **the total size of downloaded resources (Total Page Weight)**, measured in kilobytes (KB) or megabytes (MB) and indicate the total size of all downloaded resources. These variables are used to build a regression model that helps determine how each of these factors affects overall page performance, allowing for more accurate predictions and identifying underlying issues.

CNNs we use to analyze images and videos, which can be useful for evaluating visual aspects of web page performance, such as image and video load times. The CNN neural network allows to analyze

screenshots of web pages at different stages of loading to discover which elements appear earlier or later and how this affects the user's perception.

LSTM (Long Short-Term Memory) or GRU (Gated Recurrent Unit) are used to analyze data sequences. They are used for modeling user interaction, which is a sequence of actions. RNNs can model user click sequences and their site navigation, taking into account previous actions to predict next steps and assess how interface changes may affect overall performance.

Software system collects a large amount of data about user interaction with web pages, including loading times of various resources, clicks, page scrolling, etc. The data is cleaned and converted into a format suitable for training neural networks. For example, images can be normalized, and click sequences can be encoded.

CNNs are trained on images or videos to recognize patterns related to page load times and rendering. RNNs learn from sequences of clicks and other user interactions to understand behavioral patterns and predict future actions.

After training, models analyze new data about user interactions and network conditions. Simulating different scenarios (such as low network bandwidth) allows to evaluate how these conditions affect performance. Analysis results are used to generate performance optimization recommendations. If CNN finds that large images have a strong impact on load times, it can suggest optimizing the images or using responsive formats. According to the research, using neural networks, the performance of web applications can increase on average by 15-20%. Neural networks allow more accurate analysis of the impact of various parameters on the performance of web pages by modeling complex user interactions and network conditions.

Designing a software system architecture for evaluating the performance of web applications using regression analysis uses the integration of several components to provide data collection, processing, and analysis. The data obtained from such a model will be used in the sub calculations of the assessment of the impact of various factors on the system. Below is a list of such factors:

- server factors: include data on processor load time and the amount of RAM used;
- factors of the web application client: response time, request frequency, error frequency, session duration;
- data source factors: database query time, number of active connections;

- infrastructure factors: server configuration, percentage of cached data, load distribution system performance;
- user factors: location, browser, device type;
- time factors: time of day, day of the week.

A classification method should be used in the architecture of this system, this will help to divide the data into different categories or classes based on a set of input variables. Such separation will make it possible to provide system users with better recommendations for improving the performance of the web application. Decision trees are used to hierarchically divide data into subsets based on the values of the input variables. They work by building a hierarchical structure where each node represents a condition on one of the input variables and each branch is the result of that condition, eventually leading to leaves that contain the final solution or class.

In the context of web applications, decision trees can be used to classify requests into different performance categories, such as fast, medium, or slow responses. With the help of the classification of requests, we can determine which of them load the system the most, and take measures to optimize their processing. This may include changes to the web application architecture, code improvements, or server configuration (Fig. 3).

Research results. Classification methods provides more accurate predictions about web page

performance and improve user experience, to 10-15% faster page load times and a better user experience, which in turn can lower bounce rates and increase web applications user satisfaction.

Clustering helps identify patterns in query behavior that can point to specific conditions or configurations that are causing performance degradation. This, in turn, allows for more targeted and detailed optimization, which can reduce response time by 15-20% for the slowest requests.

The use of time series analysis and logistic regression allows for significant improvement in the management of website performance and availability. This provides in some cases to 20-30% reduction in downtime, which in turn increases the reliability and stability of websites, improving the user experience and reducing the financial losses associated with site unavailability.

With the help of linear regression, we can analyze the response time of requests and determine the growth trends of this indicator. If the regression model shows a steady increase in response time, this may signal potential performance issues that may arise in the future. Identifying such trends allows to take preventive measures, such as optimizing the code or increasing server resources, to avoid a decrease in the performance of the web application. Such forecasting helps reduce downtime by 10-15% and ensures more stable system operation.

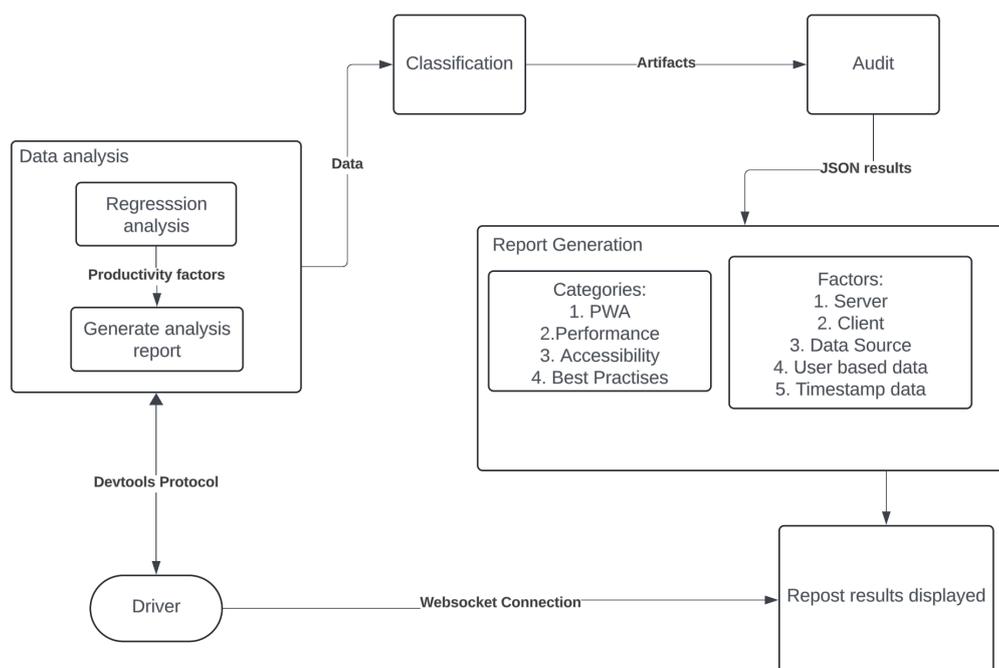


Fig. 3. The proposed architecture of the software system for intelligent analysis of the performance of web applications

Deep Neural Networks (DNNs) are used for complex analysis and predictions, including user behavior and system load. DNNs can analyze historical data about server loads during peak periods and predict when similar peak loads can be expected next time. This allows a configuration of additional resources in advance or optimize existing ones to cope with the expected increase in load. As a result of such measures, system performance is improved during peak loads, reducing the risk of downtime and ensuring continuity of service to users. This approach can increase the overall efficiency of the system in some cases by 20-25%, which significantly improves the user experience.

Conclusions and future work. The article discusses the analysis of available software solutions for evaluating the performance of web applications. Not all considered software systems are equally well suited for analyzing the performance of web applications written in JavaScript. Some have strengths on the client side, others on the server side, and some offer comprehensive analysis.

Google Lighthouse, GTmetrix, Pingdom, and WebPageTest are good for detailed client-side performance analysis but have limited capabilities

for back-end analysis. Apache JMeter is a powerful tool for server load testing, but less suitable for client-side analysis. New Relic, Dynatrace, AppDynamics, and Sentry provide end-to-end monitoring, covering both the client and backend, offering deep analysis of application, database, and infrastructure performance. LoadRunner specializes in scalable server load testing and has limited capabilities for client-side analysis.

The architecture of a software system for intelligent analyzing the performance of web applications written in JavaScript is proposed, which allows to collection of numerical data on factors affecting the performance of a web application using regression analysis, perform regression analysis to determine the assessment of the influence of factors, clustering and classification of processed data.

The proposed software system provides recommendations for web developers, which must be implemented to improve the performance of the web application and reduce the load on the web server.

According to the conducted research, the use of regression analysis and classification methods allows for an increase in the productivity of web applications by an average of 20%.

Bibliography:

1. Shailesh S., Suresh P.V. A Survey and Analysis of Techniques and Tools for Web Performance Optimization. *Journal of Information Organization*. 2018. Vol. 8. № 2. P. 31–57. DOI: 10.6025/jio/2018/8/2/31-57.
2. Leone J. and Traini L. Enhancing Trace Visualizations for Microservices Performance Analysis. *Companion of the 2023 ACM/SPEC International Conference on Performance Engineering*. 2023. P. 283–287. <https://doi.org/10.1145/3578245.3584729>.
3. Willnecker Felix, Andreas Brunnert, Wolfgang Gottesheim and Helmut Krmar. Using Dynatrace Monitoring Data for Generating Performance Models of Java EE Applications. *Proceedings of the 6th ACM/SPEC International Conference on Performance Engineering*. 2015. P. 103–104. DOI:10.1145/2668930.2688061.
4. Oleshchenko L., Burchak P. Web Application State Management Performance Optimization Methods. *Advances in Computer Science for Engineering and Education VI. ICCSEEA 2023. Lecture Notes on Data Engineering and Communications Technologies*. 2023. vol. 181. P. 59–74. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-031-36118-0_6.
5. Google Lighthouse. <https://developer.chrome.com/docs/lighthouse/overview>
6. Apache JMeter. <https://jmeter.apache.org/>
7. New Relic. <https://newrelic.com/>
8. Dynatrace. <https://www.dynatrace.com/>
9. GTmetrix. <https://gtmetrix.com/>
10. Pingdom. <https://www.pingdom.com/>
11. AppDynamics. <https://www.appdynamics.com/>
12. WebPageTest. <https://www.webpagetest.org/>
13. Sentry. <https://sentry.io/welcome/>
14. LoadRunner. <https://www.opentext.com/en-gb/products/loadrunner-professional>

Олещенко Л.М., Бурчак П.В. ПРОЕКТУВАННЯ АРХІТЕКТУРИ ПРОГРАМНОЇ СИСТЕМИ ДЛЯ ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОГО АНАЛІЗУ ПОКАЗНИКІВ ПРОДУКТИВНОСТІ ВЕБЗАСТОСУНКІВ

Сьогодні зростає кількість вебзастосунків, які обробляють великі обсяги даних, що створює нові виклики для розробників і користувачів. Вебзастосунки, які працюють з великими даними, стають важливою частиною бізнесу, державного управління та повсякденного життя, сприяючи підвищенню

ефективності, точності та швидкості прийняття рішень. Однак з цим пов'язані численні проблеми, такі як забезпечення безпеки та конфіденційності даних, ефективна обробка та зберігання великих обсягів інформації, а також необхідність постійного моніторингу і оптимізації продуктивності вебзастосунків. Управління ресурсами та енергоефективність стають особливо актуальними в умовах економії енергоресурсів. Вирішення цих проблем потребує використання новітніх технологій, таких як інтелектуальні системи моніторингу та аналізу, що допомагають забезпечити стабільну та ефективну роботу вебзастосунків в умовах постійного зростання обсягів даних і складності задач.

Вирішення проблем продуктивності вебзастосунків за допомогою інтелектуальних систем моніторингу дозволить розробникам швидко і точно виявляти вузькі місця та оптимізувати код, що, в свою чергу, забезпечить кращий користувацький досвід і зменшення витрат на обслуговування. Наразі існують невирішені питання, такі як складність інтеграції нових технологій у вже існуючі системи, необхідність врахування різноманітних факторів впливу на продуктивність, а також забезпечення високого рівня безпеки і конфіденційності даних під час моніторингу.

У статті проаналізовано наявні програмні рішення Google Lighthouse, Apache JMeter, New Relic, Dynatrace, GTmetrix, Pingdom, AppDynamics, WebPage Test, Sentry та LoadRunner, їх функціональні можливості, основні переваги та недоліки. Проаналізовано можливості використання технологій машинного навчання та штучного інтелекту в розглянутих програмних системах. На основі проведеного аналізу запропоновано архітектуру програмної системи для інтелектуального аналізу продуктивності вебзастосунків, написаних мовою JavaScript, яка дозволяє виконувати збір числових даних про фактори, що впливають на продуктивність вебзастосунку, виконувати регресійний аналіз для визначення оцінки впливу факторів, кластеризацію та класифікацію оброблених даних для коректності виділення рекомендацій для розробників, які необхідно вжити задля покращення продуктивності вебзастосунку та зменшення навантаження на вебсервер. Згідно проведених досліджень, використання методів машинного навчання в програмних системах аналітики показників вебзастосунків дозволяє збільшити продуктивність вебзастосунків в середньому на 20 %.

Ключові слова: архітектура програмної системи, оцінка продуктивності вебзастосунків, JavaScript, машинне навчання, AI, регресійний аналіз, кластеризація, класифікація, нейронні мережі.

УДК 004.942

DOI <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2024.4/23>**Павленко В.Д.**

Національний університет «Одеська політехніка»

Глуца А.С.

Національний університет «Одеська політехніка»

Гідулян В.І.

Національний університет «Одеська політехніка»

ПЛАТФОРМА ДЛЯ ХМАРНИХ ОБЧИСЛЕНЬ У НЕЙРОФІЗІОЛОГІЧНИХ ДОСЛІДЖЕННЯХ НА ОСНОВІ ДАНИХ АЙТРЕКІНГУ

Метою роботи є розробка архітектури та web-версії програмного комплексу, що розширює діагностичні можливості інструментальних засобів модельно-орієнтованої інформаційної технології оцінювання нейрофізіологічного стану, забезпечує кросплатформеність застосунків, підвищує продуктивність та ефективність наукових досліджень з використанням методів непараметричної ідентифікації досліджуваної око-рухової системи за даними айтрекінгу за рахунок застосування запропонованої нової концепції організації хмарних обчислень. Отримала подальший розвиток технологія хмарних обчислень на основі запропонованої концепції організації хмарних сервісів працюючих одночасно за принципами: платформа як сервіс PaaS (Platform as a Service) та програмне забезпечення як сервіс SaaS (Software as a Service). Розроблено архітектуру та програмний комплекс у рамках нової концепції організації хмарних обчислень, що розширює діагностичні можливості інструментальних засобів модельно-орієнтованої інформаційної технології оцінювання нейрофізіологічного стану та підвищує продуктивність та ефективність наукових досліджень з використанням методів непараметричної ідентифікації досліджуваної око-рухової системи за даними айтрекінгу. Програмний комплекс складається з багатьох незалежних модулів та вузлів, які працюють у взаємодії, що дозволяє швидко та ефективно розширювати його функціонал. Важливою особливістю даного програмного комплексу є неможливість до апаратного забезпечення на клієнтській стороні завдяки хмарним обчисленням, поєднання одночасно як PaaS так SaaS принципів роботи та модульну структуру взаємодії функціональних вузлів, що дозволяє легко масштабувати комплекс. Комплекс має переваги перед іншими подібними сервісами: можливість ефективно працювати у дослідницьких і навчальних напрямках як з програмним кодом на декількох мовах програмування Python, Java, C# для удосконалення алгоритмів тощо, так і з реалізованими раніше методами ідентифікації у вигляді GUI інтерфейсів; соціальні можливості і високий рівень абстракції для оптимізації дослідницького процесу.

Ключові слова: web-застосунок, хмарні сервіси, хмарні обчислення, PaaS, SaaS, технологія айтрекінгу, нейрофізіологічні дослідження.

Постановка проблеми. Аналіз взаємозв'язку око-рухових функцій і центральної нервової системи, а також розпізнавання психоемоційного стану людини сприяє вивченню мозкових механізмів і їх порушень, динаміки психофізіологічних станів людини, принципів сприйняття, процесів мислення, уяви, а також диференціація особистих намірів і установок. Технологія стеження за очима (eye-tracking) нині ефективно використовується в діагностичних дослідженнях нейрофізіологічних станів [1–4], у дослідженні когнітивних процесів і пам'яті [5], для моніторингу поведінки та навчання студентів [6]. Такі

дослідження дозволяють краще зрозуміти поведінку людини, як свідому, так і підсвідому. Знання про рухи очей мають важливе теоретичне і прикладне значення, розширюють можливості для вивчення специфіки багатьох професій для підвищення ефективності трудової діяльності суб'єкта. Широке застосування апаратного забезпечення для інноваційної інформаційної технології айтрекінгу в експериментальних дослідженнях нейронних процесів вимагає розробки спеціалізованого програмного забезпечення для управління великими масивами даних [7–9]. Є попит на надійні і точні показники психічного здоров'я окремих

людей і груп населення, а також обґрунтовані показники для моніторингу достовірності та валідності даних. Застосування розпізнавання емоцій дозволяє зробити висновок про стан нервової системи та оцінити її стан у повсякденних ситуаціях підвищеного ризику. Аналізуючи зміни траєкторій руху очей, можна зробити конкретні висновки про психофізіологічний стан досліджуваних.

Для впровадження даної технології в наукові дослідження в різних інституціях та навчальних закладах доцільно реалізувати її із застосуванням хмарних сервісів.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Сучасні науковці приділяють значну увагу дослідженню хмарних сервісів.

Хмарні технології забезпечують динамічне масштабування, гнучкість, низькі витрати та доступність, проте мають і виклики сфері безпеки. Вони призначені для консолідації ІТ-інфраструктур, аутсорсингу ІТ-ресурсів, а також об'єднання обчислювальних ресурсів на базі серверів, сховищ, мереж і програм зі спільним доступом [10–11].

Хмарні сервіси є вже не новим явищем у багатьох напрямках, але їм поки що не приділялося достатньо уваги у контексті створення комплексних сервісів з використанням хмарних технологій для наукової та освітньої діяльності. В наш час розвиток сучасних інформаційно-комунікаційних технологій (ІКТ) та комп'ютерних послуг сприяє формуванню нових інформаційно-комунікаційних процесів [12–15]. Існує багато областей застосування хмарних сервісів, але у сферах освітнього процесу та наукових досліджень варто відзначити їхню роль в оптимізації та спрощенні доступу до освітніх і дослідницьких процесів та ресурсів.

Хмарні сервіси доцільно поділити на такі види:

– Інфраструктура як сервіс IaaS (Infrastructure as a Service): надання обчислювальної потужності та інфраструктурних ресурсів через Інтернет. Користувачі можуть отримати віртуальні машини, зберігання даних та інші інфраструктурні ресурси за потребою.

– Платформа як сервіс PaaS (Platform as a Service): сервіс надає платформу для розробки, тестування та розгортання додатків. Користувачі можуть концентруватися на розробці програмного забезпечення, оскільки багато інфраструктурних питань приховані від них.

– Програмне забезпечення як сервіс SaaS (Software as a Service): надання доступу до вже готового програмного забезпечення через Інтернет. Користувачі можуть використовувати програми без необхідності їх установки та оновлення.

Хмарні технології – це набір методів і технічних засобів, що обробляються на відповідному сервері та передають через інтернет необхідну інформацію користувачу. Вони можуть бути використані для візуалізації даних, проведення обчислень, розв'язування задач у різних дослідницьких проектах та освітньому процесі, організації індивідуальної діяльності та колективної співпраці науковців, а також для моніторингу і контролю знань здобувачів освіти [16–18].

Хмарні технології ефективно виконують функції інформаційного сховища та комунікаційної і функціональної платформи для різних видів діяльності. Проте в різних напрямках дослідницької роботи та освітнього процесу часто виникає потреба у хмарних сервісах як PaaS так і SaaS вида одночасно. Це дозволило б задовольнити потреби проектів, де потрібно працювати на рівні програмного коду над удосконаленням алгоритмів або на рівні програми та проектів, виступаючих у ролі вже реалізованого програмного інтерфейсу із вбудованим функціоналом для проведення досліджень.

У даний час для підтримки хмарних обчислень застосовуються такі сервіси як Jupyter [19] і Google Colab [20]. Це більше інтерактивні блокноти, ніж платформи для проведення експериментів і роботи з результатами та вони використовуються як редактори та середовища виконання для однієї мови програмування, але не забезпечують можливість працювати над програмним кодом проектів на декількох мовах програмування одночасно та не дають можливості взаємодіяти з вже реалізованими інтерфейсами для хмарних обчислень у нейрофізіологічних дослідженнях на основі даних айтрекінгу.

MATLAB Online [21] – це повноцінне середовище розробки, але в ньому повністю відсутня соціальна складова, що заважає ефективній командній роботі. Крім того, в ньому відсутній набір реалізованих інтерфейсів для хмарних обчислень у нейрофізіологічних дослідженнях на основі даних айтрекінгу. Іншим істотним недоліком MATLAB Online є відсутність підтримки будь-якої іншої мови програмування.

Існує потреба у створенні нової концепції організації хмарних обчислень у нейрофізіологічних дослідженнях на основі даних айтрекінгу та програмного комплексу/платформи що підтримуватиме хмарні обчислення одразу двох видів PaaS і SaaS. Це дозволить ефективно працювати у дослідницьких і навчальних напрямках як з програмним кодом на декількох мовах програмування

Python, Java, C# для удосконалення алгоритмів тощо, так і з реалізованими раніше методами ідентифікації у вигляді GUI інтерфейсів. Також, зважаючи на великий об'єм даних для проектів на даній платформі та їх можливу залежність один від одного, важливою частиною є соціальна складова, яка дозволить спростити обмін даними між науковцями та між проектами, підвищити продуктивність наукових досліджень, чого немає у схожих існуючих рішеннях.

Постановка завдання. Метою даного дослідження є розробка архітектури та функціональної web-версії програмного комплексу, що розширює діагностичні можливості інструментальних засобів модельно-орієнтованої інформаційної технології оцінювання нейрофізіологічного стану, забезпечує кросплатформеність застосунків, підвищує продуктивність та ефективність наукових досліджень з використанням методів непараметричної ідентифікації досліджуваної око-рухової системи на основі даних айтрекінгу за рахунок застосування запропонованої нової концепції організації хмарних обчислень.

Виклад основного матеріалу дослідження.
Концепція організації хмарних обчислень. Запропонована нова концепція організації хмарних обчислень яка полягає у об'єднанні двох видів взаємодії платформи з користувачем: PaaS та SaaS (рис. 1). Це дає можливість так органі-

зувати хмарні обчислення, щоб завдяки вбудованого інтерфейса та і за допомогою редактора програмного коду здійснювати дослідження за проектами на рівні програмного коду та удосконалювати його.

Нова концепція дозволить проводити дослідницьку та освітню діяльність, модифікувати проекти на рівні програмного коду в рамках одного програмного комплексу. Це дозволяє спростити та оптимізувати процес обміну інформацією та результатами досліджень.

Архітектура програмної платформи. Розроблено концепцію, архітектуру та робочу версію веб-орієнтованого комплексу/платформи, що забезпечує інтерфейс та функціональність для хмарних обчислень за наступними принципами роботи: платформа як сервіс PaaS та програмне забезпечення як сервіс SaaS.

Комплекс дозволяє автоматизувати дослідження для ідентифікації нелінійних динамічних систем і додавання нових методів за допомогою вбудованого редактора коду (PaaS-сервіс). Крім того, він надає можливість редагувати та виконувати код скрипта будь-якого методу ідентифікації (якщо код організований відповідно до документації), додавати до коду список параметрів експерименту, виконувати обчислення за допомогою інтегрованого скрипт-коду на сервері, збирати результати у браузері на стороні клієнта і зберігати

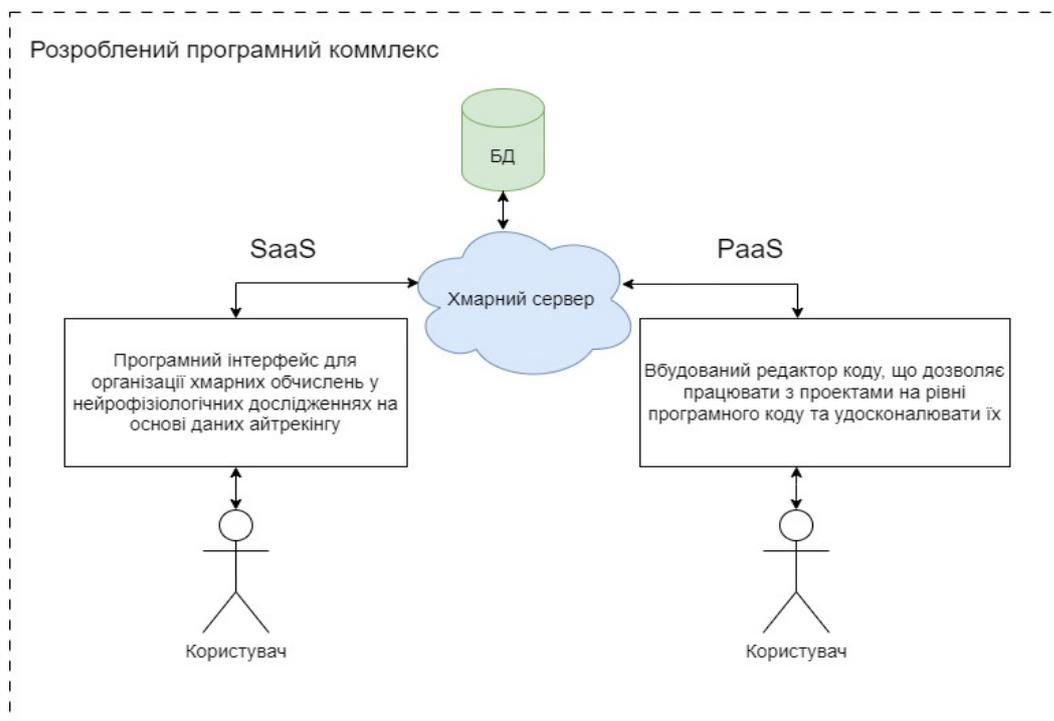


Рис. 1. Концепція організації хмарних обчислень

їх. Комплекс дозволяє здійснювати спеціальну підготовку даних експериментальних досліджень око-рухової системи (ОРС), отриманих від айтрекера, для подальшої обробки в процедурі нелінійної динамічної ідентифікації (SaaS-сервіс). Процес підготовки даних складається з наступних етапів:

Етап 1: Очищення даних:

- зчитування даних, наданих айтрекером;
- визначення та виділення з потоку даних окремих циклів досліджень для кожного респондента;
- видалення артефактів;
- витяг числових масивів відгуків на тестові візуальні стимули;
- відокремлення фрагментів – масивів відповідей на окремі стимули;
- видалення фіксацій різної тривалості на перехідному процесі.

Етап 2: Передобробка даних:

- перетворення послідовності фрагментів у паралельну структуру та приведення відгуків в циклі досліджень до спільного початку;
- нормалізація даних.

Етап 3: Процедура ідентифікації:

- проведення процедури ідентифікації ОМС за даними, отриманими після передобробки.

Розроблені програмні засоби являють собою програмний комплекс, що складається з багатьох модулів і вузлів, які взаємодіють між собою. Нижче наведено схематичне зображення взаємодії модулів платформи (рис. 2).

Панель адміністратора програми – інтерфейс користувача для базової конфігурації платформи:

- управління обліковими записами користувачів;
- управління загальною службовою інформацією.

Ця частина підключається до Firebase API для збереження змін і відображення інформації.

Інтерфейс користувача (основний інтерфейс програми) – інтерфейс користувача для взаємодії з платформою та використання її функцій:

- додавання нових методів ідентифікації;
- редагування існуючих методів відповідно до прав доступу та редагування;
- зміна даних облікового запису;
- додавання співавторів і обмін методами ідентифікації з ними;
- збереження та обмін результатами експерименту.

Ця частина містить вбудований редактор коду (інтерфейс для завантаження нових методів ідентифікації), що дозволяє ефективно працювати з кодом методів ідентифікації. Підключається до Firebase API для збереження змін і відображення інформації.

Firebase API – ця частина служби обробляє всі клієнтські запити, і надсилає запити до бази даних або служби, яка використовується як база даних (бібліотека Firebase). Незалежність цієї частини комплексу дозволяє з легкістю додавати клієнти з інших платформ (Windows, MacOS, Linux, Android, iOS та ін.).

Середовище виконання коду – ізольована частина програмного комплексу, яка діє як програма для виконання коду для Python, C#, Java, JavaScript, на якій виконуються сценарії всіх

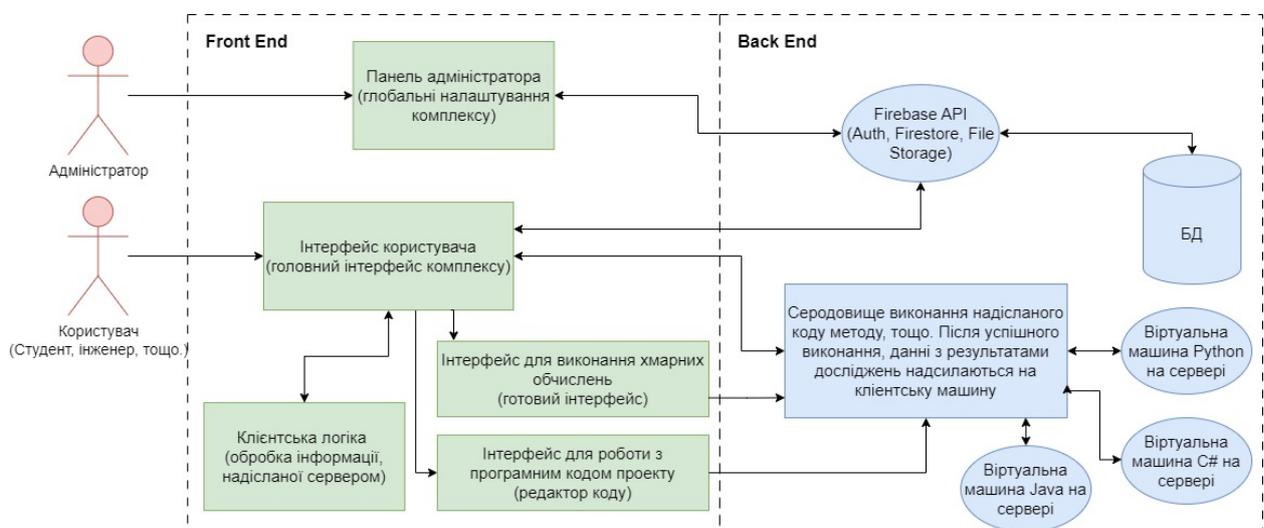


Рис. 2. Структура програмного комплексу

методів ідентифікації. Потім результати надсилаються на клієнтську частину для подальшого ознайомлення і, якщо потрібно, зберігання в базі даних. Для інтерпретації коду використовується віртуальна машина Python, C#, Java, JavaScript.

Бібліотека Firebase – бібліотека компонентів, яка через свій API дозволяє працювати з PostgreSQL базою даних Firebase Firestore для зберігання даних користувача. Він також підтримує Firebase Auth для аутентифікації користувачів і контролю доступу, а також Firebase Storage для зберігання файлів.

Firebase Auth – модуль, який може автентифікувати користувачів лише за допомогою коду на стороні клієнта. Він підтримує вендорів соціальних мереж, таких як Facebook, GitHub, Twitter, Google і Google Play Games, і містить систему керування користувачами для аутентифікації користувачів за допомогою електронної пошти та пароля, які зберігаються у Firebase.

Firebase Storage забезпечує надійне завантаження та вивантаження файлів для застосунків *Firebase* незалежно від якості мережі. Розробник може використовувати його для зберігання зображень, аудіо-, відео- чи іншого вмісту, створеного користувачами. Зберігання *Firebase* підтримується *Google Cloud Storage*.

Розроблений комплекс – це модульний програмний комплекс, що складається з:

- незалежна серверна частина, яка включає всі обчислювальні модулі, базову логіку та обробку даних. Кожен модуль окремий і може масштабуватися незалежно;
- клієнтська частина, яка представляє інтерфейс користувача та клієнтську логіку і є кро-

сплатформеним веб-інтерфейсом, що представляє з себе SPA (односторінковий додаток).

У той же час, структурно та з точки зору взаємодії функціональних компонентів програмний продукт складається з 4-х основних компонентів (рис. 3):

- сервер, що займається управлінням усіма технічними процесами: приймання запитів, надання відповідей на запити, формування завдань агентам, збереження інформації у базі даних;
- веб-інтерфейс, що надає користувачу можливість користуватися сервісом та працювати з проектами;
- агенти – обчислювальні компоненти які виконують поставлені завдання, інтерпретують надісланий код;
- база даних для збереження усіх даних комплексу та проектів.

На схемі зображено усі можливі варіанти спілкування структурних елементів сервісу між собою, а саме:

- A1, A3 – Клієнт відправляє завдання серверу;
- B1 – Сервер відправляє завдання агенту;
- B2 – Агент відправляє результат серверу;
- A2, A4 – Сервер відправляє результат/данні клієнту;
- C1 – Сервер зберігає інформацію у базі даних;
- C2 – Сервер отримує інформацію з бази даних.

Така архітектура дозволяє незалежно вести розробку та масштабування обох частин комплексу. Що дозволить у майбутньому додати до комплексу мобільні додатки та інші пропріє-

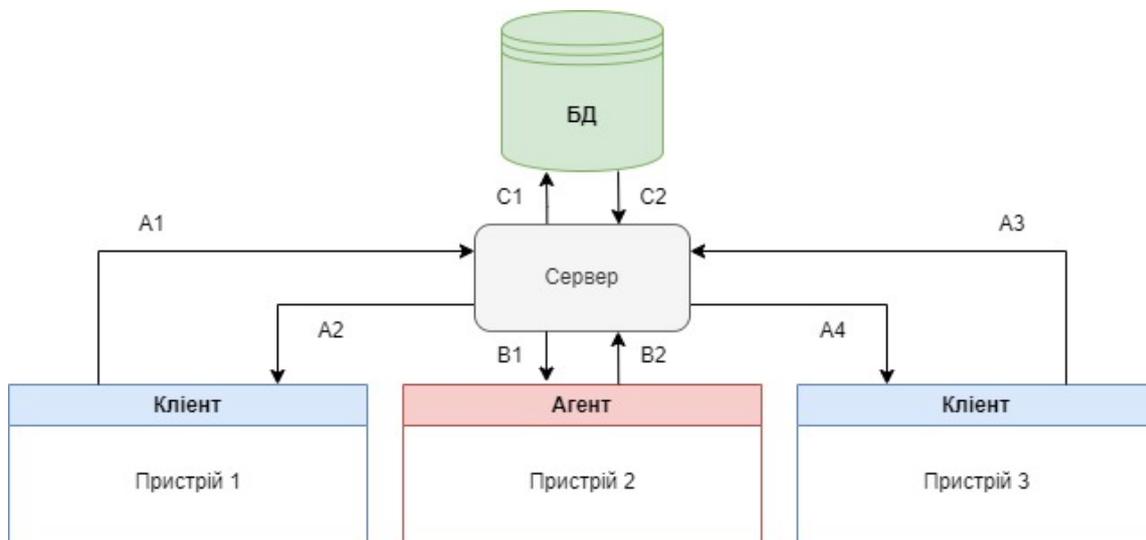


Рис. 3. Структурна схема роботи сервісу

тарні додатки для будь яких платформ. Також, завдяки тому, що вся логіка та обробка даних знаходиться у серверній частині проекту, створено API-інтерфейс, який дозволить стороннім додаткам використовувати функціонал розробленого програмного комплексу. Це надає можливість ще більше масштабувати проект.

Результати досліджень. Процес роботи з програмним комплексом для отримання результатів складається з наступних кроків, які відображені на схемі (рис. 4).

Як видно на схемі, модулі незалежні, що дозволяє ефективніше масштабувати, не впливаючи один на одного. При необхідності, до серверних модулів можуть бути підключені альтернативні клієнти для різних платформ або завдань. У той же час сервер можна розширити додатковими модулями без необхідності змінювати існуючих клієнтів.

На сторінці входу користувачі можуть отримати доступ до функцій платформи, ввівши ім'я користувача та пароль. На перших етапах роботи сервісу функція реєстрації буде недоступна для

користувачів. Усі облікові записи створить адміністратор служби (суперадмін). Це зроблено для забезпечення посиленого контролю над базою користувачів під час закритого тестування.

Головна сторінка сервісу виступає у ролі інформаційної панелі, яка консолідує всю ключову інформацію для користувача: останні події проекту, інформацію про облікові записи, обраних користувачів, останні проекти. Крім того, на цій сторінці користувачі можуть перейти до повного списку обраних користувачів і проектів, натиснувши відповідні посилання/кнопки. Щоб переглянути інформацію про обраного користувача, користувач повинен натиснути на його ім'я, і він побачить ту саму інформаційну панель, але з інформацією про обраний обліковий запис (якщо він не обмежений для перегляду).

Сторінка користувача використовується для перегляду та редагування особистої інформації користувача, зокрема: фото користувача (аватара), імені, номера телефону, електронної пошти, навчального закладу, який відвідує користувач, тощо.

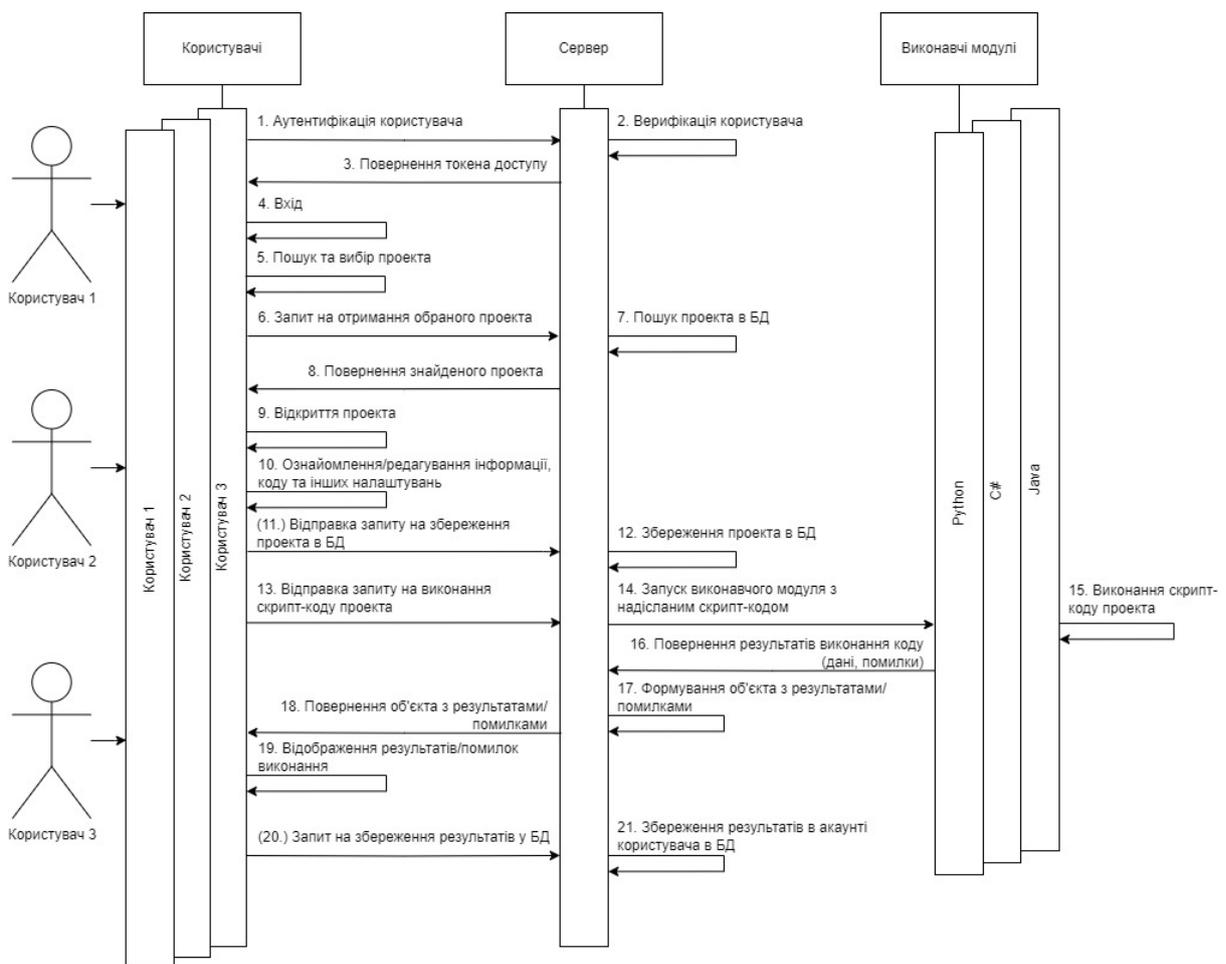


Рис. 4. Процес роботи з програмним комплексом

Сторінка проектів надає доступ до публічних проектів, доступних на сервісі, і власних проектів користувача. Картка проекту, що відображається на сторінці, містить коротку інформацію про нього: назву, дату останнього редагування, автора, короткий опис проекту. На цій сторінці користувачі можуть створювати нові публічні або приватні проекти. За замовчуванням проект створюється як приватний і недоступний для інших користувачів сервісу, але його можна зробити публічним у налаштуваннях проекту. Розділ над списком проектів дозволяє фільтрувати, відображаючи проекти для користувача наступним чином: усі загальнодоступні та приватні проекти, доступні лише для користувача. Будь-який користувач може переглядати та запускати сценарії публічних проектів, але редагувати вихідний код такого проекту та інформацію про нього неможливо. Щоб мати можливість працювати з загальнодоступним проектом, як з вашим власним, користувачу потрібно скопіювати його як свій проект. Це дозволить вам повністю редагувати вихідний код проекту, його інформацію та працювати з результатами.

Натиснувши на проект, користувач переходить на його сторінку. Сторінка проекту дозволяє користувачам переглядати проект і керувати ним, зокрема:

- перегляд опису проекту, його коду та результатів минулих досліджень (за наявності);

- редагування коду проекту, якщо користувач має права доступу (користувач може не мати таких прав, якщо він не є власником, тобто проект публічний або спільний);

- початок виконання скрипт-коду проекту;
- аналіз результатів дослідження (рис. 5);
- спільний доступ до проекту (коду та результатів дослідження) вибраним обліковим записам.

Основним є процес виконання коду проекту. Цей процес і процес надання результатів, що відбувається на клієнті, можна описати наступним псевдокодом:

```
algorithm execute_code_on_server is
input: project
if (is_running) return
if (!project.code) return
out := null
err := null
is_running := true
out, err := request('POST /',
project.code, project.files)
is_running := false
if (err)
show_errors(err)
return
graphs = parse(out)
show_results(graphs)
```

Процес, що відбувається на сервері для надання результатів, може бути описаний таким псевдокодом:

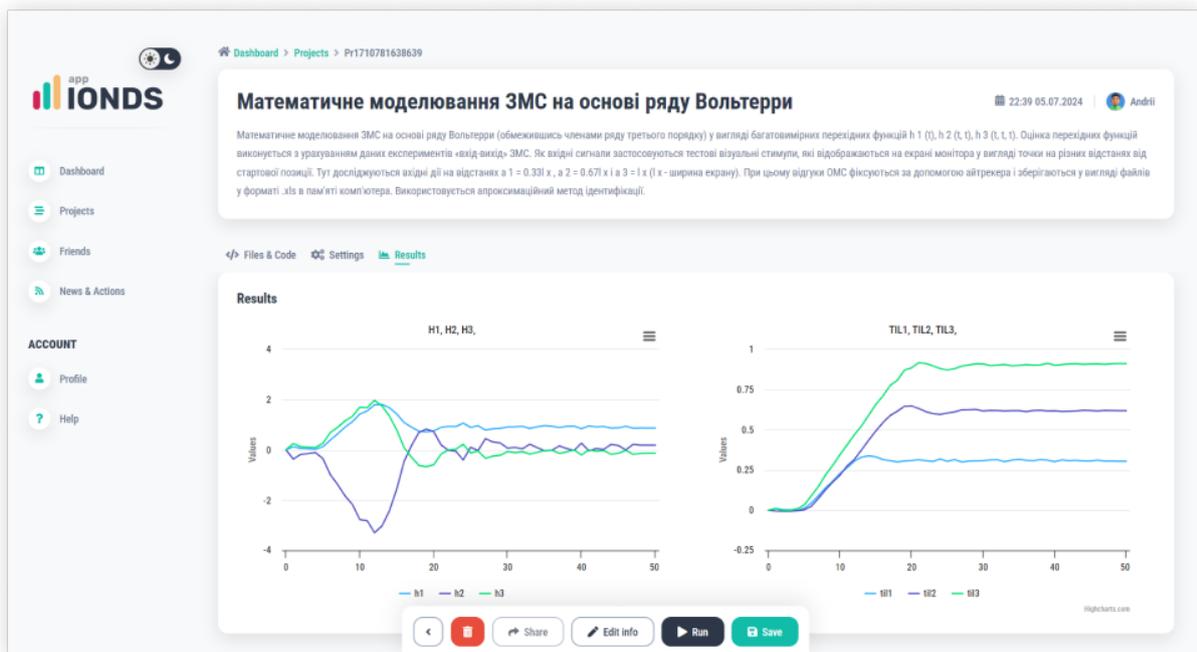


Рис. 5. Приклад результатів досліджень

Порівняльна таблиця конкурентних рішень

| | Google Colab | MATLAB online | Project Jupyter | Розроблений програмний комплекс |
|---------------------------------------|--------------|---------------|-----------------|---------------------------------|
| Соціалізація | +/- | - | - | + |
| Рівень абстракції | + | + | - | + |
| Підтримка декількох мов програмування | - | - | - | + |

```

algorithm server is
on POST / do
uid := generate_unique_id()
project_path := get_project_path(uid)
create_project_dir(project_path)
main_path := project_path + "main.ext"
save_file(request.code, main_path)
for each file in request.files do
save_file(file, project_path)
out, err := execute(main_path)
return uid, out, err
    
```

Характеристики та недоліки аналогів. Основними аналогами проекту є Jupyter [15], MATLAB Online [16] і Google Colab [17].

В цих застосунках можуть виконуватися тільки вузькоспеціалізовані завдання, але, на відміну від реалізованого програмного комплексу, не дозволяють виконувати комплексну проектну роботу з алгоритмами на одразу декількох мовах програмування, проводити нейрофізіологічні дослідження на основі даних айтрекінгу у рамках вже реалізованих інтерфейсів, обмінюватися результатами та використовувати інші проекти/методи (що стосується простоти пошуку цих методів тощо) для покращення результатів дослідження. Всі зазначені аналоги працюють виключно з однією мовою програмування і не надають можливість вибору інших мов, які можуть знадобитися при роботі з різними алгоритмами, методами ідентифікації тощо (табл. 1), яка є у розробленому програмному комплексі. У всіх цих конкурентних рішеннях відсутній соціальний компонент, що перешкоджає ефективному обміну проектними даними, безпосередньо проектами та спільній співпраці над проектами користувачів. У той же час, цього недоліку немає у реалізованому програмному комплексі через зручну можливість обміну даними між проектами та дослідниками.

Метою комплексу є реалізація можливості в одному місці працювати з популярними мовами програмування та готовими методами (у вигляді інтерфейсів) для досліджень, а також підвищення рівня абстракції, що оптимізує процес дослідження та надає нові можливості для його корис-

тувачів. Програмний комплекс поєднав у собі найкращі характеристики конкурентних рішень для покращення взаємодії з користувачем під час дослідження (рис. 6).

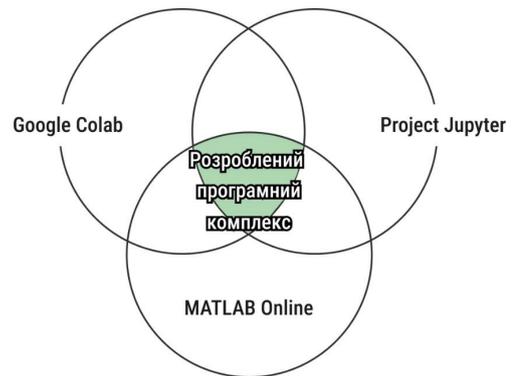


Рис. 6. Порівняння з конкурентними рішеннями

Наукова новизна. Вперше запропоновано дослідження з діагностування нейрофізіологічного стану людини на основі модельно-орієнтованої інтелектуальної інформаційної технології та експериментальних даних айтрекінгу, здійснюване за підтримки технології хмарних обчислень, що значно підвищує продуктивність та ефективність наукових досліджень, при участі в процесі діагностування багатьох дослідників з довільною локацією.

Отримала подальший розвиток технологія хмарних обчислень на основі запропонованої нової концепції організації хмарних сервісів працюючих одночасно за принципами: платформа як сервіс PaaS та програмне забезпечення як сервіс SaaS; що має переваги по відношенню до відомих подібних платформ, спрощує дослідницькі та освітні процеси та забезпечує невимогливість до апаратного забезпечення та кросплатформеність розробленого програмного комплексу.

Висновки. Розроблено архітектуру та програмний комплекс, у рамках нової концепції організації хмарних обчислень, що розширює діагностичні можливості інструментальних засобів модельно-орієнтованої інформаційної технології оцінювання нейрофізіологічного стану, забезпечує кросплатформеність застосунків, підвищує

продуктивність та ефективність наукових досліджень з використанням методів непараметричної ідентифікації досліджуваної око-рухової системи за даними айтрекінгу.

Комплекс забезпечує можливість ефективно працювати у дослідницьких і навчальних напрямках як з програмним кодом на декількох мовах програмування Python, Java, C# для удосконалення алгоритмів тощо, так і з реалізованими раніше методами ідентифікації у вигляді GUI інтерфейсів та працювати з платформою на будь-якому пристрої як з хмарним сервісом.

Важливою особливістю розробленого програмного комплексу є неможливість до апаратного забезпечення на клієнтській стороні завдяки хмарним обчисленням, поєднання одночасно як PaaS так SaaS принципів роботи та модульну структуру взаємодії функціональних вузлів, що

дозволяє легко масштабувати комплекс. Програмний комплекс має переваги по відношенню до таких сервісів як Project Jupyter, Matlab Online, Google Colub, а саме: можливість працювати з популярними мовами програмування та готовими методами у вигляді GUI інтерфейсів для досліджень, а також підвищення рівня абстракції та соціалізації, що оптимізує дослідницький процес та надає нові можливості для його користувачів. Комплекс має підтримку виконання скриптів методів на таких мовах програмування, як: Python, C#, Java. При розробці програмних засобів були використані: мова програмування JavaScript; мови HTML та CSS для створення інтерфейсу, фреймворк Vue.js [22] для мови JavaScript; Python для реалізації методів нелінійної динамічної ідентифікації; Node.js для реалізації клієнт-серверної взаємодії комплексу.

Список літератури:

1. Opwonya J., Doan D.N.T., Kim S.G. et al. (2022), "Saccadic Eye Movement in Mild Cognitive Impairment and Alzheimer's Disease: A Systematic Review and Meta-Analysis", *Neuropsychol Rev*, 32, pp. 193–227; <https://doi.org/10.1007/s11065-021-09495-3>
2. Jansson D., Rosén O., and Medvedev A. (2015), "Parametric and nonparametric analysis of eyetracking data by anomaly detection", *IEEE Transaction control system technology*, 23, pp. 1578–1586; doi:10.1109/TSCST.2014.2364958
3. Bro V., Medvedev A. (2023), "Continuous and Discrete Volterra-Laguerre Models with Delay for Modeling of Smooth Pursuit Eye Movements", *IEEE Transactions on Biomedical Engineering*, 70(1), pp. 97–104.
4. Lanata L., Sebastian L., Di Gruttola F., Di Modica S., Scilingo E.P., and Greco I A. (2020) "Nonlinear Analysis of Eye-Tracking Information for Motor Imagery Assessments", *Frontiers in Neuroscience*, 2020, 13:1431; doi: 10.3389/fnins.2019.01431.
5. Keehn B., Monahan P., Enneking B., et al. (2024), "Eye-Tracking Biomarkers and Autism Diagnosis in Primary Care", *JAMA Netw Open*;7(5) : e2411190, pp.1-14; doi:10.1001/jamanetworkopen.2024.11190
6. Weiss K., Kolbe M., Lohmeyer Q., and Meboldt M. (2023) "Measuring teamwork for training in healthcare using eye tracking and pose estimation", *Front. Psychol.* 14: 1169940, pp.1–12; <https://doi.org/10.3389/fpsyg.2023.1169940>
7. Pavlenko V., Shamanina T., Chori V. (2023) "Eyetracking Technology and its Application in Neuroscience", *Proceedings of the The 12th IEEE International Conference on Intelligent Data Acquisition and Advanced Computing Systems: Technology and Applications (IDAACS-2023)*, 7-9 Sept., Dortmund, Germany. Vol. 1, pp. 187-193.
8. Pavlenko V., Shamanina T. and Chori V. (2022) "Biometric Identification based on the Multidimensional Transient Functions of the Human Oculo-Motor System", *5th International Conference on Applied Physics, Simulation and Computing (APSAC-2021)*, 3-5 Sept., Salerno, Italy. *J. Phys.: Conf. Ser.* 2162, 012024, pp. 1-9.
9. Pavlenko V.D., Shamanina T.V., Chori V.V. (2023) "Estimation Psychophysiological State via Integral Nonlinear Model of the Oculo-Motor System", *Applied Aspects of Information Technology*. 2023. Vol. 6, No. 2, pp.117–129. DOI:<https://doi.org/10.15276/aait.06.2023.8>
10. Вихрист, О. В., Петрова, Р. В. (2023) «Хмарні обчислення: переваги та недоліки». *Збірник матеріалів IX Міжнародної молодіжної науково-практичної інтернет-конференції*. pp. 314-316
11. Fatima, E., Sumra, I. A., Naveed, R. (2024). «A Comprehensive Survey on Security Threats and Challenges in Cloud Computing Models (SaaS, PaaS and IaaS)». *Journal of Computing & Biomedical Informatics*, 7(01), pp. 537-544.
12. Yoo, S. K., Kim, B. Y. (2019). «The effective factors of cloud computing adoption success in organization». *The Journal of Asian Finance, Economics and Business*, 6(1), pp. 217-229.
13. Досенко А. К. (2022) «Хмарні технології: прикладні технології сучасних платформ». *Вчені записки ТНУ імені ВІ Вернадського*, (33 (72)), p.p. 257-262.

14. Гришук А., Хімко Я. (2023) «Хмарні технології: поняття, особливості використання». Збірник матеріалів VII Всеукраїнської науково-практичної конференції «Теоретико-прикладні проблеми правового регулювання в Україні» р.р. 137-139.
15. Смірнова Т. В., Поліщук Л.І., Смірнов О.А., Буравченко К.О., Макевнін А.О. (2020) «Дослідження хмарних технологій як сервісів». *Кибербезпека: освіта, наука, техніка*. Т. 3. № 7, рр. 43–62.
16. Яремчук, Д. С. (2024) «Сервіси і додатки хмарних обчислень». Збірник тез IV Міжнародної науково-практичної інтернет-конференції «Цифрова трансформація фінансової системи України та країн v-4 в умовах євроінтеграції» рр. 95-97.
17. Saraswat, M., Tripathi, R. C. (2020). «Cloud computing: Analysis of top 5 CSPs in SaaS, PaaS and IaaS platforms». 9th International Conference System Modeling and Advancement in Research Trends (SMART) рр. 300-305.
18. Kollipara, P. (2021). «An Overview on Cloud Computing». *International Journal of Research in Engineering, Science and Management*, 4(8), рр. 35-37.
19. Project Jupyter: <https://jupyter.org>
20. Google Colab: <https://colab.research.google.com>
21. MATLAB Online: <https://www.mathworks.com/products/matlab-online.html>
22. Vue.js framework <https://vuejs.org/guide/introduction.html>

Pavlenko V.D., Ilutsa A.S., Gidulian V.I. A PLATFORM FOR CLOUD COMPUTING IN NEUROPHYSIOLOGICAL RESEARCH BASED ON EYETRACKING DATA

The purpose of the work is the development of the architecture and web version of the software complex, which expands the diagnostic capabilities of the tools of model-oriented information technology for assessing the neurophysiological state, ensures cross-platform applications, increases the productivity and efficiency of scientific research using methods of non-parametric identification of the investigated eye-motor system based on eye tracking data due to the application of the proposed new concept of cloud computing organization. The technology of cloud computing received further development based on the proposed concept of organization of cloud services working simultaneously according to the principles: platform as a service PaaS (Platform as a Service) and software as a service SaaS (Software as a Service). An architecture and software complex has been developed within the framework of a new concept of cloud computing organization, which expands the diagnostic capabilities of the tools of model-oriented information technology for assessing the neurophysiological state and increases the productivity and efficiency of scientific research using methods of non-parametric identification of the investigated eye-motor system based on eye tracking data. The software complex consists of many independent modules and nodes that work in interaction, which allows you to quickly and efficiently expand its functionality. An important feature of this software complex is that it does not require hardware on the client side thanks to cloud computing, the combination of both PaaS and SaaS operating principles and the modular structure of the interaction of functional nodes, which allows for easy scaling of the complex. The complex has advantages over other similar services: the ability to effectively work in research and educational areas both with programming code in several programming languages Python, Java, C# for improving algorithms, etc., and with previously implemented identification methods in the form of GUI interfaces; social opportunities and a high level of abstraction to optimize the research process.

Key words: web-application, cloud services, cloud computing, PaaS, SaaS, eye-tracking technology, neurophysiological research.

Пахомова В.М.

Український державний університет науки і технологій

Старіков Д.І.

Український державний університет науки і технологій

ПРОЕКТУВАННЯ БАЗИ ДАНИХ МЕДИЧНИХ ПРЕПАРАТІВ, ЩО СКЛАДАЄ ОСНОВУ ІНФОРМАЦІЙНО-ПОШУКОВОЇ СИСТЕМИ

У статті для пошуку медичних препаратів, що розташовані в мережах аптек окремого міста, спроектовано базу даних (БД) з використанням наступних методів: методу «Нормальні форми» та методу «ER-діаграм», за результатами яких отримані п'ять результуючих відношень: АПТЕКИ (Назва аптеки, Адреса аптеки, Телефон, Години роботи, Власник аптеки); ПРОДАЮТЬ (Назва аптеки, Назва ліків, Кінцева дата реалізації, Адреса аптеки, Форма випуску); ЛІКИ (Назва ліків, Країна виробник, Медичний ряд); ВИРОБНИК (Країна виробник, Ціна за одиницю); РЕЦЕПТ (Медичний ряд, Лікарський дозвіл), що співпадають за своїми структурами та відповідають вимогам нормальної форми Бойса-Кодда. Засобами SQL програми Microsoft Access створено спроектовану базу даних, проведено її тестування на основі реальних даних по розташуванню медичних препаратів в мережах аптек міста Дніпро, наведені приклади обробки створеної бази даних. Крім того, розроблений інтерфейсний додаток за допомогою середовища Microsoft Visual Studio на платформі Windows Presentation Foundation з використанням Entity Framework 6 для використання користувачем створеної бази даних; наведені приклади її використання: додавання нової інформації до існуючої бази даних (з отриманням для користувача відповідних повідомлень про успішне або неприпустиме введення даних); пошук медичного препарату в мережах аптек міста з визначенням аптеки, власника, адреси та годин її роботи; отримання інформації про наявність медичного препарату, а також його виробника, цінову категорію та дозвіл на придбання в заданій аптеці міста. Рекомендовано створену базу даних знаходження медичних препаратів в мережах аптек міста Дніпро щодо використання в додатковій (розробленій) інформаційно-пошуковій системі відповідного напрямку.

Ключові слова: медичний препарат, мережа аптек, проектування БД, нормальна форма, діаграма ER-типу, інформаційно-пошукова система.

Постановка проблеми. Наш сучасний світ стрімко розвивається за напрямом цифровізації різних послуг населення, зокрема аптечної справи на основі використання існуючих сервісів: «Державний реєстр лікарських засобів України» (www.drlez.com.ua); «Бронюйте товари у аптеках, економте до 30 %» (Tabletki.ua); «Доставка ліків з України в Європу» (Liki24.com) та ін., які значно полегшують роботу як самих працівників відповідної сфери, так і їх користувачів. Однак, існуючі сервіси мають як вразливі переваги, так і деякі недоліки при їх використанні. Крім того, існування на сучасному етапі значної кількості аптечних мереж, різноманітність самих медичних препаратів, що пропонуються різними виробниками, породжують у свою чергу різні цінові категорії, що потребує впровадження додаткової (розробленої) інформаційно-пошукової системи відповідного напрямку.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Відомо, що основу інформаційно-пошукової системи повинна складати база даних, для проектування якої можливе використання [2, 5]: кла-

сичного методу (метод нормальних форм з використанням математичного апарату відношень) та графічного методу (метод «Сутність-зв'язок» з використанням діаграм ER-типу). Під час проектування різних баз даних необхідно знайти відповіді на наступні питання [3-4, 6, 12-13]: які дані, повинні зберігатися в базі даних; яким чином користувач буде мати доступ до бази даних; яким чином дані повинні бути згруповані; які дані будуть зв'язані між собою; до яких даних найчастіше потребується доступ та ін. У якості засобів програмної реалізації спроектованої бази даних на сучасному етапі можливе використання [7-11]: Altibase; Microsoft Access; MySQL; Oracle; SQL Azure; PostgreSQL; MySQL Workbench та ін., що потребує проведення додаткового дослідження для співставлення відповідних програм за наступними ознаками [2]: основні характеристики; інтерфейс і вартість. Для досягнення оптимальної швидкості роботи з базою даних необхідно, не тільки оптимізувати спроектовану базу даних (що досягається при нормалізації відношень

при проектуванні), так і оптимізувати оператори доступу до бази даних [1]. З одного боку, погано оптимізована база даних потребує багато зайвих зусиль з оптимізації операторів SQL, з іншого боку, навпаки, гарна оптимізація бази даних не допоможе, якщо використані оператори без відповідної оптимізації, що також потребує проведення додаткового дослідження.

Формулювання цілей статті. Проведені дослідження ставили за мету розвиток методики створення додаткової (розробленої) інформаційно-пошукової системи знаходження медичних препаратів в мережах аптек окремого міста. Для досягнення поставленої мети вирішувалися наступні задачі: спроектувати базу даних розташування медичних препаратів з використанням різних методів (методу нормальних форм та методу «ER-діаграм»); створити спроектовану базу даних засобами SQL програми Microsoft Access; розробити інтерфейсний додаток за допомогою Microsoft Visual Studio для використання користувачем створеної бази даних розташування медичних препаратів в мережах аптек.

Виклад основного матеріалу дослідження. Вивчення предметної області надало можливість визначити наступні атрибути: Назва аптеки; Назва ліків; Кінцева дата реалізації; Адреса аптеки; Телефон; Години роботи; Власник аптеки; Країна виробник; Ціна за одиницю; Медичний ряд; Лікарський дозвіл; Форма випуску та сформулювати початкове відношення.

Проектування БД за методом нормальних форм. Складене початкове відношення, що знаходиться в першій нормальній формі (1НФ), але в якому проглядається явне та неявне надлишкове дублювання даних. Виявлені функціональні залежності атрибутів початкового відношення, графічна інтерпретація яких показана на рис. 1.

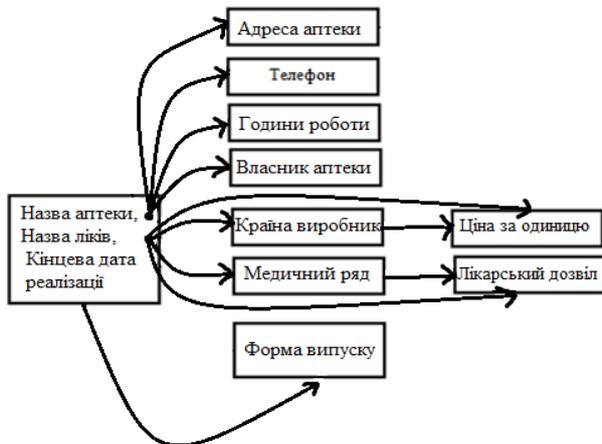


Рис. 1. Графічна інтерпретація залежності атрибутів відношення

Перший етап нормалізації (це переведення відношення із 1НФ до 2НФ), мета якого позбутися част-

кової залежності. Для цього побудовані відповідні проєкції, що знаходяться в 2НФ, та графічні інтерпретації залежності атрибутів відношень R1-R2 представлені на рис. 2-3 відповідно.

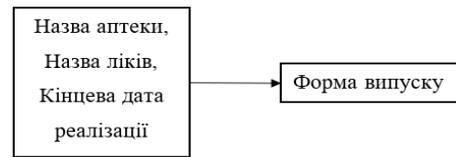


Рис. 2. Графічна інтерпретація залежності атрибутів відношення R1

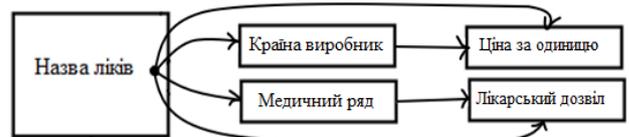


Рис. 3. Графічна інтерпретація залежності атрибутів відношення R2

Другий етап нормалізації (це переведення відношення із 2НФ до 3НФ), мета якого позбутися транзитивної залежності. Для цього побудовані відповідні проєкції, що знаходяться в 3НФ, та графічні інтерпретації залежності атрибутів відношень R4-R6 представлені на рис. 4-6 відповідно.

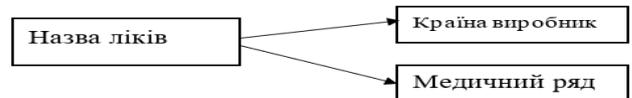


Рис. 4. Графічна інтерпретація залежності атрибутів відношення R4



Рис. 5. Графічна інтерпретація залежності атрибутів відношення R5



Рис. 6. Графічна інтерпретація залежності атрибутів відношення R6

Усі отримані результуючі відношення задовольняють вимогам нормальної форми Бойса-Кодда. Загальна структура спроектованої БД за методом нормальних форм (НФ) показана на рис. 7.

Проектування БД за методом «Сутність-зв'язок». На першому етапі проектування необхідно виявити сутності (АПТЕКИ, ЛІКИ, ПРОДАЮТЬ, ВИРОБНИК, РЕЦЕПТ) та зв'язки між ними: АПТЕКИ ПРОДАЮТЬ ЛІКИ; ЛІКИ ВИРОБЛЯЄ ВИРОБНИК; ЛІКИ МАЮТЬ РЕЦЕПТ.

На другому етапі проектування необхідно визначити для кожного зв'язку його ступінь (1:1,

1:Б, Б:1 або Б:Б) та характеристики класів приналежності екземплярів сутності (обов'язковий чи необов'язковий). Побудована діаграма ER-типу, що показана на рис. 8. Так, наприклад, зв'язок АПТЕКИ ПРОДАЮТЬ ЛІКИ має ступінь Б:Б (кожна аптека може продавати різні ліки, в свою чергу конкретний медичний препарат може бути запропонований до продажу різними аптеками). Для даного зв'язку клас приналежності екземплярів сутності АПТЕКИ обов'язковий (кожна аптека продає ліки), а також клас приналежності екземплярів сутності ЛІКИ обов'язковий (кожний медичний препарат продається аптекою).

На третьому етапі проектування на основі отриманої ER-діаграми та з використанням відповідних правил методу «Сутність-зв'язок» формуються попередні відношення, а саме: АПТЕКИ; ЛІКИ, ПРОДАЮТЬ, ВИРОБНИК, РЕЦЕПТ.

На четвертому етапі проектування додаються до відношень атрибути, що залишилися, та всі результуючі відношення перевіряються до вимог БКНФ. Загальна структура спроектованої БД за графічним методом (методом «ER-діаграм») показана на рис. 9.

Проектування бази даних виконано за різними методами: «Нормальні форми» та «Сутність-зв'язок», в результаті чого отримано п'ять відношень, які співпадають (АПТЕКИ=R3; ПРОДАЮТЬ=R1; ЛІКИ=R4; ВИРОБНИК=R5; РЕЦЕПТ=R6), що підтверджує вірність проведеного проектування бази даних розташування медичних препаратів в аптеках міста.

Створення спроектованої бази даних. За допомогою засобів SQL в Microsoft Access створено спроектовану базу даних розташування медичних препаратів в аптеках міста Дніпро. У якості прикладу наведено програмну конструкцію по створенню таблиці ПРОДАЮТЬ:

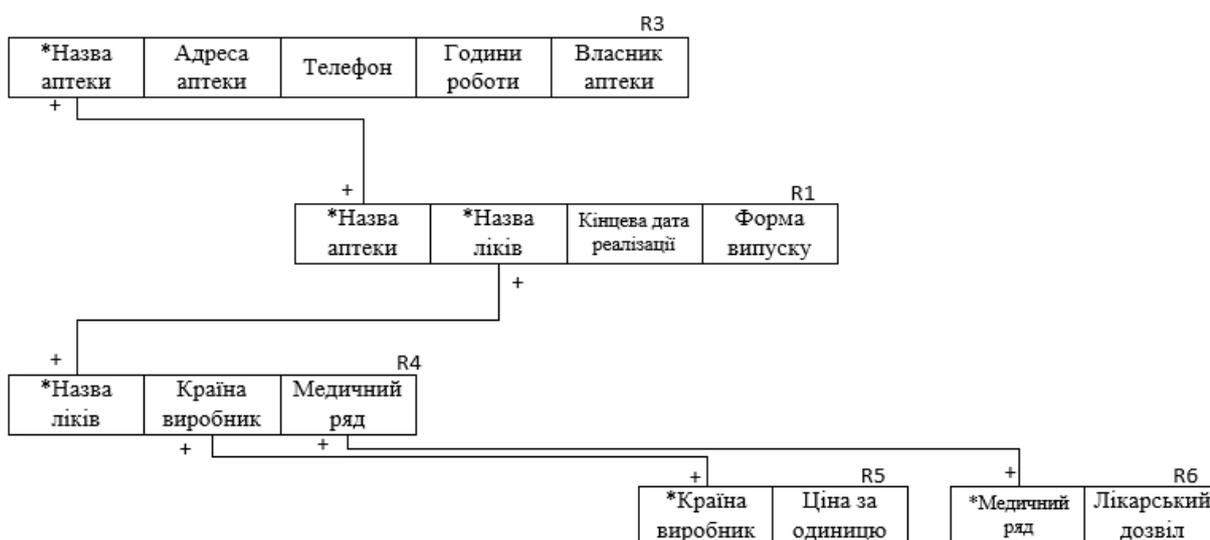


Рис. 7. Загальна структура спроектованої БД за методом НФ

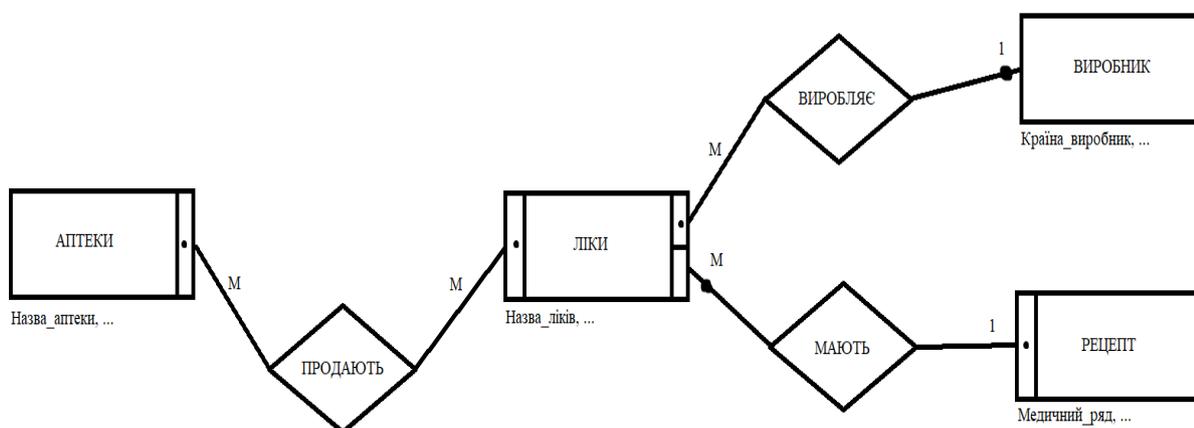


Рис. 8. Отримана діаграма ER-типу

```
CREATE TABLE Продають
(АптекаID INT,
ЛікиID INT,
Кінцева_дата_реалізації DATETIME NOT
NULL,
Форма_випуску VARCHAR(255) NOT NULL,
PRIMARY KEY (АптекаID, ЛікиID),
FOREIGN KEY (АптекаID) REFERENCES
Аптеки(АптекаID),
FOREIGN KEY (ЛікиID) REFERENCES
Ліки(ЛікиID));
```

Розробка інтерфейсного додатку для використання користувачем. Інтерфесний додаток розроблений за допомогою середовища розробки Microsoft Visual Studio на платформі Windows Presentation Foundation з використанням Entity Framework 6 для роботи зі створеною базою даних.

Головне вікно інтерфейсного додатку складається із випадючого переліку «INSERT DATA» та кнопок «SEARCH MEDICINES» і «PHARMACY STOCK». Так, наприклад, за допомогою «INSERT DATA» можливе проводити додавання даних до створеної БД на вкладках: «MEDICINE»; «PHARMACY»; «STOCK», структури яких показані на рис. 10.

Якщо користувачем додається до БД інформація, яка в неї зберігається, тоді він отримає повідомлення про помилку (рис. 11).

При успішному введенні нової інформації до створеної БД користувач отримає відповідне повідомлення (рис. 12).

Для пошуку медичного препарату необхідно скористатися кнопкою «SEARCH MEDICINES». У якості прикладу відображений результат пошуку знаходження спазмалгона на рис. 13.

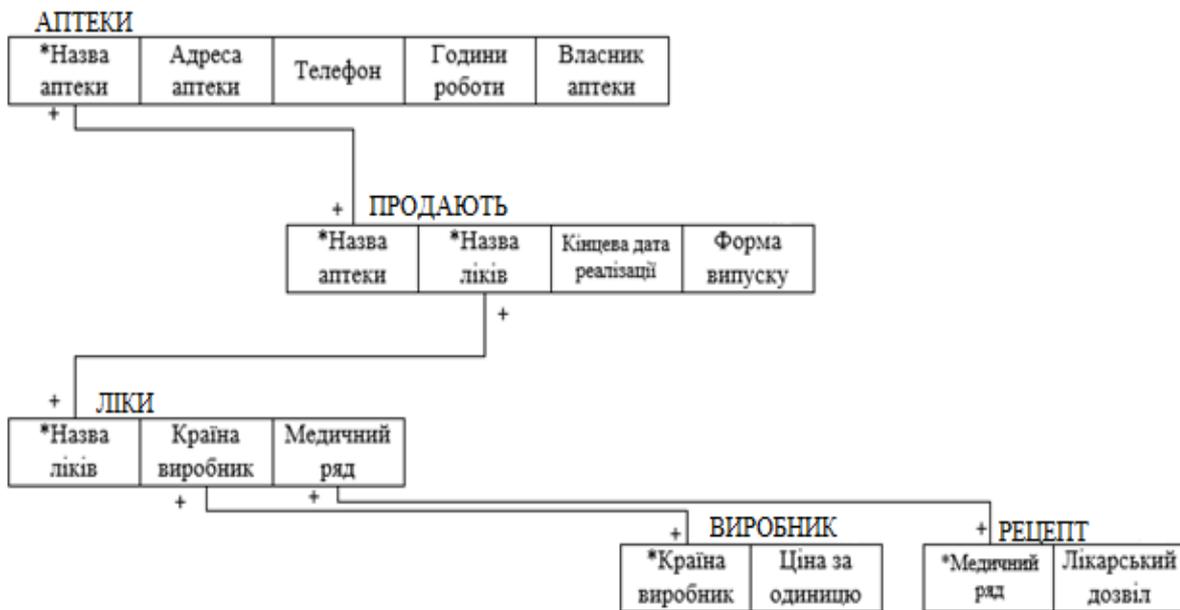


Рис. 9. Загальна структура спроектованої БД за методом «ER-діаграм»



Рис. 10. Вкладки «MEDICINE», «PHARMACY», «STOCK»



Рис. 11. Повідомлення про помилку при введенні даних

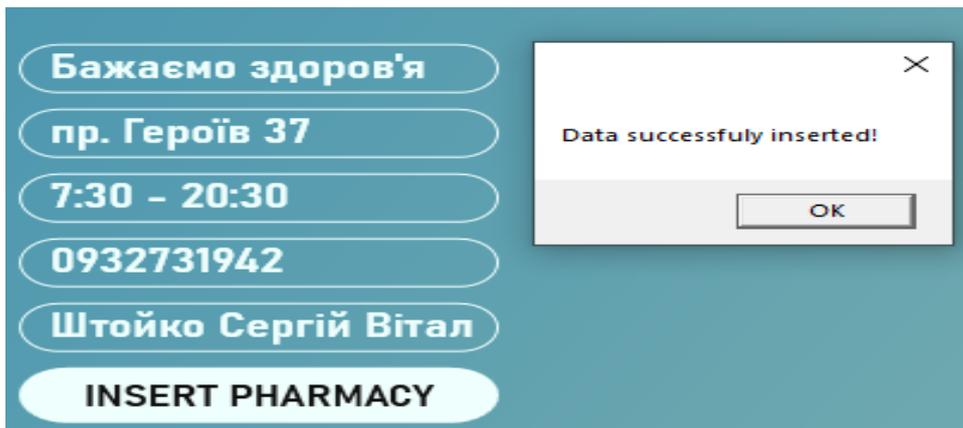


Рис. 12. Повідомлення про успішне введення даних

Спазмалгон SEARCH

| АптекаId | НазваАптеки | АдресаАптеки | ГодиниРоботи | Телефон | ВласникАптеки | ЦінаЗаОдиницю |
|----------|-------------|-------------------|--------------|--------------|----------------------------|---------------|
| 1 | Мед-сервіс | Вул. Марії Кюрі 5 | 08:00-21:30 | 380503752725 | Кожан Сергій Станіславович | 102.32 |

Рис. 13. Результат пошуку знаходження в аптеках спазмалгона

Для отримання інформації про наявність ліків в конкретній аптеці необхідно скористатися кнопкою «PHARMACY STOCK». У якості прикладу поданий результат пошуку наявності ліків в «Аптеці оптових цін» на рис. 14.

Висновки. На основі аналізу предметної області сформульовано початкове відношення, ступінь якого 12, а потужність – 15. Проектування бази даних розташування медичних препаратів в мережах аптек окремого міста виконано за різними методами: «Нормальні форми» та «ER-діаграм»; в результаті чого отримано п'ять результуючих відношень, які співпадають

за структурами, що підтверджує вірність проведеного проектування бази даних. Створено засобами SQL програми Microsoft Access спроектовану базу даних; для тестування використані дані по розташуванню медичних препаратів в мережах аптек міста Дніпро; наведені відповідні приклади обробки бази даних. Розроблений інтерфейсний додаток за допомогою середовища Microsoft Visual Studio на платформі Windows Presentation Foundation з використанням Entity Framework 6 для використання користувачем створеної бази даних. Розроблений інтерфейсний додаток передбачає додавання нової інформації до існуючої



| ЛікиId | НазваЛіків | КраїнаВиробник | МедичнийРяд | ЛікарськийДозвіл | ЦінаЗаОдиницю |
|--------|-------------------|----------------|----------------|------------------|---------------|
| 6 | Спіруліна | Україна | Водорослі | Без рецепту | 113.28 |
| 7 | Німесил | Німеччина | Протизапальні | За рецептом | 375.27 |
| 8 | Амітриптилін | Україна | Антидепресанти | За рецептом | 113.28 |
| 9 | Мефенамінка | Україна | Протизастудні | Без рецепту | 113.28 |
| 10 | Есциталопрам-Тева | Ізраїль | Антидепресанти | За рецептом | 885.4 |

Рис. 14. Результат пошуку наявності ліків в «Аптеці оптових цін»

бази даних, а також організацію пошуку медичного препарату в мережах аптек міста (адреса, телефон, години роботи) та отримання інформації про наявність медичних препаратів (виробник, ціна, дозвіл на отримання) в аптеці; наведені від-

повідні приклади. Створену базу даних розташування медичних препаратів в мережі аптек міста Дніпро можна рекомендувати щодо використання в додатковій (розробленій) інформаційно-пошуковій системі відповідного напрямку.

Список літератури:

1. Pakhomova V.M., Hrestyan A.V. Design, creation and optimization of the scientific development database of the department. *Modern engineering and innovative technologies*. Germany, Karlsruhe: Sergeieva&Co, «ISE&E». 2022. Issue № 23. Part 1. Pp. 61-67. DOI: 10.30890/2567-5273.2022-23-01-031
2. Pakhomova V.M. Design of databases by bachelor's degree applicants when writing a qualification paper. *International scientific publication "Promising scientific researches of Eurasian scholars '2023"*. USA, Washington: KindleDP Seattle. 2023. Pp. 66-73. DOI: 10.30888/2709-2267.2023-20-01-012
3. Вдовичин Т.Я., Лазурчак Л.В. Проектування інформаційно-пошукових систем як засіб використання сучасних технологій. *Вчені записки ТНУ імені В.І. Вернадського. Серія: Технічні науки*. 2022, № 4. Том 33 (72). С. 66-71. <https://doi.org/10.32838/2663-5941/2022.4/11>
4. Гарбера І.В. Лінгвістична база даних «Концепт людина у фразеології східноєвропейських українських говірок»: структура та функції. *Лінгвістичні студії*. Вип. 37. 2019. С. 123-130. DOI: 10.31558/1815-3070.2019.37.21
5. Дистанційний курс з дисципліни «Бази даних» для здобувачів ступеня «бакалавр» спеціальностей «Комп'ютерна інженерія» і «Кібербезпека»; укладач Пахомова В.М. Сертифікат № ДК0288 від 20.07.2018.
6. Лакида П.І., Бідолах Д.І., Кузьович В.С. Просторова база даних урболандшафтів на прикладі зелених насаджень міста Бережани. *Науковий вісник НЛТУ України*. Том 30. № 4. 2020. С. 51-56. <https://doi.org/10.1036930/40300409>
7. Офіційний сайт Altibase [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://www.altibase.com/en/>
8. Офіційний сайт PostgreSQL [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://www.postgresql.org>
9. Офіційний сайт Oracle Database [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://docs.oracle.com/en/database/oracle/oracle-database/19/cncpt/introduction-to-oracle-database.html>
10. Офіційний сайт SQL Azure [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://docs.microsoft.com/ru-ru/azure/azure-sql/database/sql-database-paas-overview?view=azuresql>
11. Офіційний сайт MySQL [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://www.mysql.com>
12. Пахомова В., Мартиняк Д. Створення бази даних моделей та характеристик комутаторів локальних мереж. *Modern engineering and innovative technologies*. Germany, Karlsruhe: Sergeieva&Co, «ISE&E». 2023. Issue № 29. Part 1. Pp. 12-18. DOI: 10.30890/2567-5273.2023-29-01-078
13. Сікора О.В., Вдовичин Т.Я., Когут У.П. Технології програмування інформаційних систем. *Таврійський науковий вісник. Серія: Технічні науки*. 2022. № 2. С. 10-17. <https://doi.org/10.32851/tnv-tech.2022.2.2>

Pakhomova V.M., Starikov D.I. DESIGN OF A DATABASE OF MEDICINES, WHICH FORMS THE BASIS OF AN INFORMATION RETRIEVAL SYSTEM

In the article, to search for medicines located in the pharmacy chains of a particular city, a database is designed using the following methods: the "Normal forms" method and the "ER-diagrams" method, according

to the results of which five resulting relations were obtained: PHARMACIES (Pharmacy name, Pharmacy address, Telephone, Opening hours, Pharmacy owner); SELL (Name of pharmacy, Name of the medicine, End date of sale, Address of the pharmacy, Release form); MEDICINES (Name of the medicine, Country of origin, Medical series); MANUFACTURER (Country of origin, Unit price); PRESCRIPTION (Medical Series, Medical Clearance) that coincide in their structures and meet the requirements of the normal Boyce-Codd form. By means of the SQL program Microsoft Access, the designed database was created, its testing was carried out on the basis of real data on the location of medicines in the pharmacy chains of the city of Dnipro, examples of processing the created database are given. In addition, a front-end application was developed using the Microsoft Visual Studio environment on the Windows Presentation Foundation platform using Entity Framework 6 for the user to use the created database; examples of its use are given: adding new information to the existing database (with receiving appropriate notifications for the user about successful or unacceptable data entry); search for a medicinal product in the pharmacy chains of the city with the definition of the pharmacy, owner, address and hours of its operation; obtaining information about the availability of the medicine, as well as its manufacturer, price category and permission to purchase in a given pharmacy in the city. It is recommended to create a database of the location of medicines in the pharmacy chains of the city of Dnipro for use in an additional (developed) information retrieval system of the relevant direction.

Key words: medication, pharmacy chain, database design, Normal form, ER-type diagram, information retrieval system.

Петросян Р.В.

Державний університет «Житомирська політехніка»

АЛГОРИТМ ОБЧИСЛЕННЯ ЧАСТОТИ НАПРУГИ У ТРИФАЗНІЙ ЕЛЕКТРОМЕРЕЖІ НА БАЗІ ЦИФРОВИХ ФІЛЬТРІВ

У науковій статті вирішувалась важлива науково-технічна проблема – зниження похибки обчислення частоти напруги в трифазній електричній мережі. Обчислення значення частоти напруги має важливе значення, оскільки це дає змогу забезпечити надійність і стабільність роботи енергетичних об'єктів. Тривала робота обладнання при значному відхиленні частоти напруги трифазної мережі від номінального значення призводить до його підвищеного зносу та передчасного виходу з ладу. Невідповідність частоти напруги номінальному значенню також може бути причиною виникнення додаткових похибок під час вимірювання інших параметрів енергетичних об'єктів. У роботі проведено аналіз наявних алгоритмів вимірювання частоти напруги в електромережах. Один з основних недоліків більшості алгоритмів – використання тригонометричних функцій, які чутливі до різного роду похибок. В основу запропонованого алгоритму обчислення частоти напруги в трифазній електромережі покладено цифрову фільтрацію. Цифрові фільтри є важливим інструментом обробки сигналів і знаходять широке застосування в різних сферах: в енергетиці, акустиці, системах автоматики, обробці зображень тощо. Особливе місце в цифровій обробці займають нерекурсивні цифрові фільтри (фільтри з кінцевою імпульсною характеристикою), які мають ряд переваг перед іншими типами фільтрів, наприклад, можна забезпечити лінійну фазо-частотну характеристику. В ході роботи було запропоновано структурну схему обчислення частоти напруги на базі даних цифрових фільтрів, а також було виконано їх синтез. Для перевірки отриманих результатів проведено моделювання на комп'ютері з використанням мови програмування Python. Таким чином, у статті представлено комплексний підхід до вирішення проблеми зниження похибки обчислення частоти напруги в трифазній електромережі, що включає як теоретичні аспекти, так і практичний алгоритм реалізації з використанням сучасних цифрових технологій.

Ключові слова: алгоритм обчислення частоти напруги, похибка частоти напруги, трифазна електрична мережа, цифрові фільтри, метод найменших квадратів.

Постановка проблеми. Частота напруги електромережі є одним із найважливіших показників якості електроенергії, тому її вимірювання та контроль має важливе значення, оскільки це дає змогу забезпечити надійність і стабільність роботи енергетичних об'єктів: гідрогенераторів і турбогенераторів, силових підстанцій, ліній електропередачі загального призначення, систем автоматики, а також низки інших електромеханічних систем.

Тривала робота обладнання при значному відхиленні частоти напруги від номінального значення призводить до його підвищеного зносу та передчасного виходу з ладу. Також невідповідність частоти напруги в електромережі номінальному значенню може бути причиною виникнення додаткових похибок під час вимірювання інших параметрів енергетичних об'єктів. У зв'язку з цим вимірювання та контроль частоти напруги електромережі є актуальним завданням, що підтверджується великою кількістю наукових публікацій, присвячених удосконаленню методів і засобів вимірювання частоти напруги електромережі [1-7]. Особливо цьому сприяє розвиток цифрових методів, інформацій-

них технологій та комп'ютеризованих систем, що в свою чергу призводить до підвищення якості та стабільності електропостачання.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Забезпечення належної якості електричної енергії у системах електропостачання загального призначення визначаються стандартами [8, 9], де визначено основні терміни, показники якості електричної енергії та їх значення. Один з таких параметрів – це відхилення частоти основної гармоніки напруги в електромережі. Для її обчислення необхідно визначити поточне значення частоти напруги в мережі.

Як вже згадувалося, у науковій літературі є велика кількість різних алгоритмів визначення частоти змінної напруги. Усі алгоритми можна умовно поділити на два види: алгоритми обчислення частоти в частотній області та алгоритми обчислення частоти в часовій області.

До першого виду можна віднести алгоритми, які базуються на дискретному перетворенні Фур'є або його модифікаціях [3, 4]. До переваг даного виду алгоритмів можна віднести: відносно невелику

кількість відліків, простоту обчислень, а також їх умовно можна віднести до швидких алгоритмів. До недоліків цього виду алгоритмів можна віднести ефект «розтікання спектра», який частково можна зменшити з використанням віконних функцій.

До другого виду можна віднести алгоритми, засновані на лінійному передбаченні вибірок напруги [7] та вимірюванні частоти з використанням виявлення нульових переходів напруги [4, 5]. Основна їхня перевага – висока швидкість. До недоліків даних алгоритмів можна віднести: чутливість до завад, низька точність через вплив гармонійних складових. Особливо чутливі алгоритми, які використовують тригонометричні функції. Зменшити вплив даних факторів можна за допомогою попередньої фільтрації [4, 5, 7]. Також до другого виду належить алгоритм, що базується на цифровій фільтрації [6]. Перевагою цього алгоритму є: висока швидкість; низька чутливість до завад. Недоліком даного алгоритму є низька точність в околиці точки нульового переходу.

Постановка завдання. Метою роботи є розробка алгоритму обчислення частоти напруги в трифазній електричній мережі для підвищення точності з використанням цифрових фільтрів. Для досягнення поставленої мети у роботі потрібно вирішити такі завдання: провести аналіз цифрових фільтрів; запропонувати типи фільтрів для отримання квадратурних складових; синтезувати цифрові фільтри; зробити висновки з отриманих результатів.

Виклад основного матеріалу дослідження. Перераховані раніше недоліки усуваються у розробленому новому алгоритмі обчислення частоти напруги в електромережі. По суті, цей алгоритм є вдосконаленим варіантом методу, запропонованого в роботі [6].

Алгоритми, які проводять обчислення в часовій області, використовують додатково фільтрацію сигналу для усунення залежності від завад і гармонійних складових. У роботі [6] операції фільтрації та обчислення частоти суміщені в цифрових фільтрах. Принцип дії вказаного метода має наступний вигляд (рис. 1).

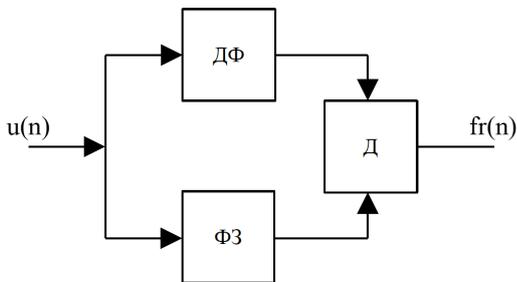


Рис. 1. Структурна схема обчислення частоти напруги: ДФ – диференціатор; ФЗ – фазозсувач; Д – дільник

ДФ та ФЗ реалізуються на базі цифрових фільтрів (ЦФ) з кінцевою імпульсною характеристикою (КИХ). Особливістю сигналу, що використовується у методі, є його форма, яка близька до гармонійної моделі (1). Це означає, що сигнал має періодичний характер і може бути описаний за допомогою синусоїдальних функцій. Гармонійна модель сигналів значно спрощує їх аналіз та обробку.

$$u(n) = U_m \sin(\omega \cdot n \cdot \Delta t + \varphi), \quad (1)$$

де U_m – амплітуда сигналу; ω – циклічна частота сигналу; n – номер відліку; Δt – крок дискретизації; φ – початкова фаза.

Використовуючи диференціатор, амплітудно-частотна характеристика (АЧХ) якого показана на рис. 2, можна отримати значення частоти (амплітуда вихідного сигналу залежить від частоти).

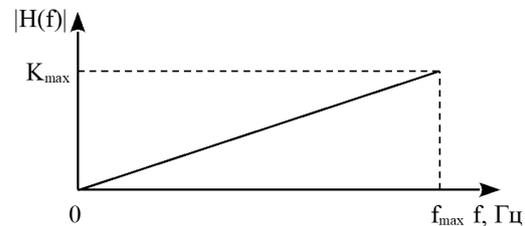


Рис. 2. АЧХ широкопasmового диференціатора

Використання широкопasmового диференціатора призводить до збільшення рівня завад, тому диференціатор повинен бути вузькопasmовим. Смуга пропускання залежить від розв'язуваної задачі і знаходиться в околиці частоти 50 Гц для електромереж (рис. 3).

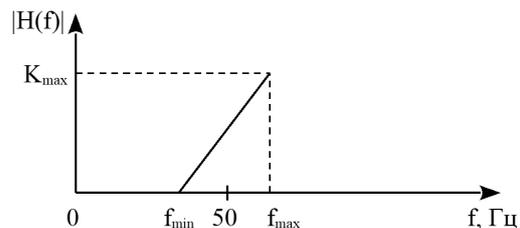


Рис. 3. АЧХ вузькопasmового диференціатора

ФЗ призначений для виконання двох функцій: синхронізації фази сигналу з сигналом на виході диференціатора; нормування сигналу на виході (рис. 1). Його АЧХ відповідає смуговому фільтру. Абсолютне значення частоти після цифрової обробки можна записати в наступному вигляді (2):

$$f_a(n) = \left(\frac{(f_{\max} - f_{\min})f_r(n)}{K_{\max}} + f_{\min} \right). \quad (2)$$

Значення K_{\max} доцільно обрати з множини $\{1; f_{\max} - f_{\min}\}$.

Основна проблема в алгоритмі, як вже зазначалося, це невизначеність, яка виникає в околиці точки нульового переходу сигналу, що призводить до підвищеної похибки в околиці даної точки. Вказаний інтервал невеликий, тому один із варіантів вирішення проблеми – пропускати обчислення, якщо такий підхід припустимий при використанні даного методу. Інший підхід полягає у тому, щоб використати трифазну електричну мережу. Варіант удосконаленого методу показано на рис. 4.

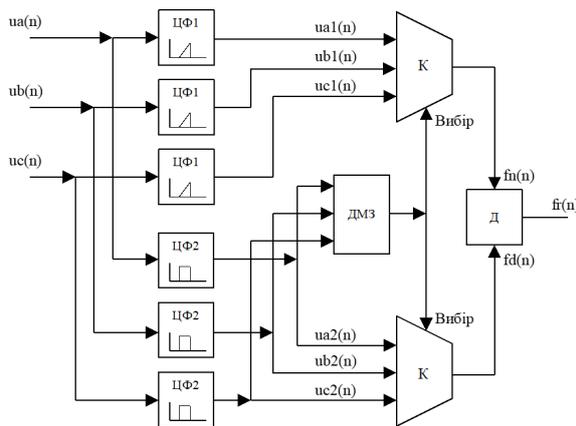


Рис. 4. Структурна схема обчислення частоти напруги у трифазній електромережі: ЦФ1, ЦФ2 – цифрові фільтри; К – комутатор (мультиплексор); ДМЗ – детектор максимального значення; Д – дільник

В даному випадку модель сигналу буде описуватися наступними виразами (3):

$$\begin{cases} ua(n) = U_m \sin(\omega \cdot n \cdot \Delta t + \varphi) \\ ub(n) = U_m \sin(\omega \cdot n \cdot \Delta t + \varphi - 120) \\ uc(n) = U_m \sin(\omega \cdot n \cdot \Delta t + \varphi + 120) \end{cases} \quad (3)$$

Ця модель відповідає симетричній трифазній електромережі, проте в реальності мережа може бути несиметричною. Представлений метод не чутливий до несиметрії в трифазній мережі, тому саме ця модель може бути використана в подальшому.

Фільтри ЦФ1 виконують функції, аналогічні ДФ (рис. 1), та їхня АЧХ має вигляд диференціатора (рис. 3). Фільтри ЦФ2 виконують функції, аналогічні ФЗ (рис. 1), та їхня АЧХ відповідає смуговому фільтру. ДМЗ призначений для визначення фази з максимальним значенням відліку. Та фаза, у якій відлік має максимальне значення, і обирається комутаторами. Далі за допомогою дільника визначається відносне значення частоти напруги в трифазній мережі.

Щоб реалізувати алгоритм, необхідно синтезувати всі шість КІХ-фільтрів, а точніше лише два з них, бо решта будуть мати аналогічні характеристики. У загальному випадку КІХ-фільтр описується наступним виразом (4):

$$y(n) = \sum_{k=0}^{K-1} h(k) \cdot x(n-k). \quad (4)$$

де $h(k)$ – імпульсна характеристика фільтра; $x(n), y(n)$ – вхідний та вихідний сигнали; K – кількість коефіцієнтів фільтра $h(k)$.

АЧХ даного фільтра матиме такий вигляд (5):

$$H(\omega) = \sum_{k=0}^{K-1} h(k) \cdot e^{-j\omega n}. \quad (5)$$

Для того, щоб КІХ-фільтри були з лінійною фазою, необхідно, щоб імпульсна характеристика була симетричною або антисиметричною [10]. В даному випадку можливі чотири типи КІХ-фільтрів.

Перший тип КІХ-фільтра має симетричну імпульсну характеристику, непарну кількість коефіцієнтів та АЧХ, яка описується виразом:

$$H(\omega) = \sum_{k=0}^{(K-1)/2} a(k) \cdot \cos(\omega k), \quad (6)$$

де $a(0) = h((K-1)/2)$; $a(k) = 2h((K-1)/2 - k)$ для $k = 1, 2, 3, \dots, (K-1)/2$.

Другий тип КІХ-фільтра має симетричну імпульсну характеристику, парну кількість коефіцієнтів та АЧХ, яка описується виразом:

$$H(\omega) = \sum_{k=1}^{K/2} b(k) \cdot \cos(\omega(k-1/2)), \quad (7)$$

де $b(k) = 2h(K/2 - k)$ для $k = 1, 2, 3, \dots, K/2$.

Третій тип КІХ-фільтра має антисиметричну імпульсну характеристику, непарну кількість коефіцієнтів та АЧХ, яка описується виразом:

$$H(\omega) = \sum_{k=1}^{(K-1)/2} c(k) \cdot \sin(\omega k), \quad (8)$$

де $c(0) = 0$, $c(k) = 2h((K-1)/2 - k)$ для $k = 1, 2, 3, \dots, (K-1)/2$.

Четвертий тип КІХ-фільтра має антисиметричну імпульсну характеристику, парну кількість коефіцієнтів та АЧХ, яка описується виразом:

$$H(\omega) = \sum_{k=1}^{K/2} d(k) \cdot \sin(\omega(k-1/2)), \quad (9)$$

де $d(k) = 2h(K/2 - k)$ для $k = 1, 2, 3, \dots, K/2$.

Третій та четвертий типи КІХ-фільтрів мають антисиметричну імпульсну характеристику, тому забезпечують зсув фази на $\pi/2$. Їх рекомендується використовувати, наприклад, для реалізації диференціаторів. Виходячи з вище сказаного, слідує, що ЦФ1 має бути реалізований з використанням

третього або четвертого типу КІХ-фільтра, а отже, аналогічного типу має бути ЦФ2, щоб забезпечити однаковий зсув.

Для синтезу ЦФ (4) будемо використовувати метод найменших квадратів, який мінімізуватиме відхилення АЧХ проєктованого фільтра від прототипу відповідно до виразу (10):

$$e = \sqrt{\int W(\omega)(H(\omega) - \hat{H}(\omega))^2 d\omega} \rightarrow \min \quad (10)$$

де $W(\omega)$ – вагова функція; $H(\omega)$, $\hat{H}(\omega)$ – АЧХ фільтрів, що проєктується та його прототипу відповідно.

Синтез ЦФ проводився за допомогою мови програмування Python та додаткових пакетів: numpy, matplotlib тощо. Для розрахунку коефіцієнтів ЦФ необхідно задати вхідні параметри. Основний параметр для поставленого завдання – діапазон відхилення частоти напруги електромережі. Відповідно до стандарту ДСТУ EN 50160:2023 [8] значення відповідає діапазону 42.5-57.5 Гц, а отже даний параметр буде вказувати смугу пропускання ЦФ1 та ЦФ2. У зв'язку з тим, що на краю смуги пропускання фільтрів похибка різко збіль-

шується, діапазон смуги пропускання фільтрів дещо розширено і відповідає значенню 40-60 Гц. Порядок фільтра впливає на точність апроксимації фільтра, що проєктується. У нашому випадку порядок фільтрів обрано 30, а максимальний коефіцієнт передачі буде $K_{\max} = 1$. Результати синтезу ЦФ показано на рис. 5а та рис. 5б. Похибка даних фільтрів у діапазоні відхилення вхідного сигналу показана на рис. 6а та рис. 6б.

Коефіцієнти синтезованих ЦФ представлені у табл. 1.

Відповідно до рис. 4 запишемо: $|H_1(\omega)| = K_1(f)$, $|H_2(\omega)| = K_2(f)$. Враховуючі це, можна записати, що значення на виході цифрового блоку обробки буде відповідати наступному виразу (11):

$$f_r(n) = \frac{K_1(f)}{K_2(f)}. \quad (11)$$

Абсолютне значення частоти буде розраховуватися за виразом (2).

Приведемо максимальну методичну похибку запропонованого методу. Значення частоти з похибкою у відповідності до виразів (2) та (11) буде:

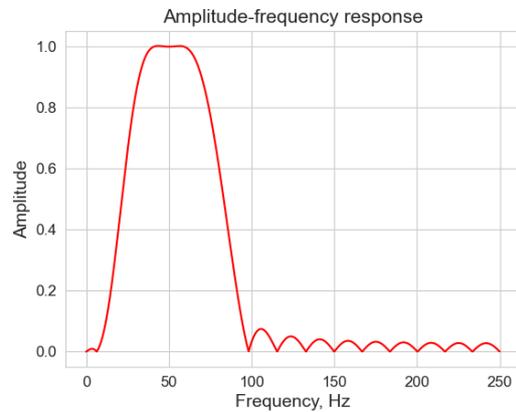
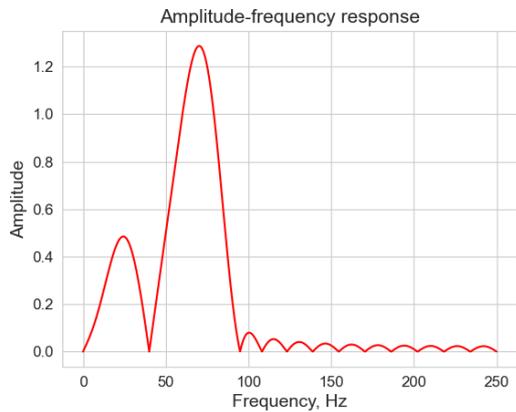


Рис. 5. Амплітудно-частотні характеристики цифрових фільтрів: а) АЧХ ЦФ1; б) АЧХ ЦФ2

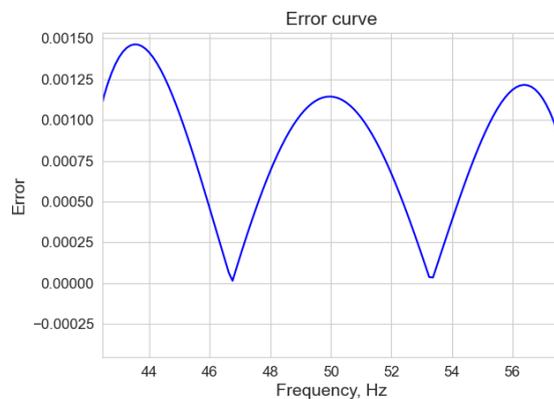
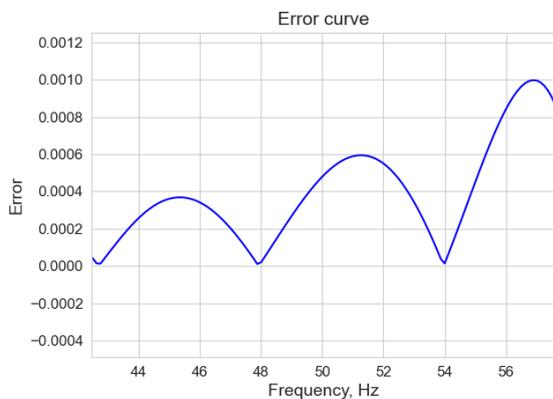


Рис. 6. Модуль відхилення амплітудно-частотних характеристик цифрових фільтрів від прототипу: а) похибка ЦФ1; б) похибка ЦФ2

Коефіцієнти ЦФ1 та ЦФ2

| Коефіцієнти | Значення ЦФ1 | Значення ЦФ2 |
|---------------|-----------------------|------------------------|
| h(0), -h(30) | 0.024650843719117244 | -0.012723323130625668 |
| h(1), -h(29) | 0.0164000540872938 | 0.0021139782409012324 |
| h(2), -h(28) | -0.00621354611251673 | -0.00807573618841248 |
| h(3), -h(27) | -0.020350630677407385 | -0.024538533294345386 |
| h(4), -h(26) | -0.00571859150039062 | -0.026332410751609563 |
| h(5), -h(25) | 0.03073704641323723 | -0.010529535040976394 |
| h(6), -h(24) | 0.05244391109078005 | 0.004139514463047637 |
| h(7), -h(23) | 0.022503902051060228 | -0.0035793974091145706 |
| h(8), -h(22) | -0.05751124106700829 | -0.0314555492514243 |
| h(9), -h(21) | -0.13680876426794197 | -0.047272968227800985 |
| h(10), -h(20) | -0.15002377590681787 | -0.013589477249120874 |
| h(11), -h(19) | -0.07314372486223417 | 0.07406858884017796 |
| h(12), -h(18) | 0.04809088499740064 | 0.17058485286650832 |
| h(13), -h(17) | 0.12738748473851216 | 0.20687405916279514 |
| h(14), -h(16) | 0.10542364295153461 | 0.14203649196194426 |
| h(15) | 0 | 0 |

$$f_a(n) + \Delta f_a = \left(\frac{(f_{\max} - f_{\min})(K_1(f) + \Delta K_1)}{K_{\max}(K_2(f) + \Delta K_2)} + f_{\min} \right), \quad (12)$$

де ΔK_1 , ΔK_2 – максимальна похибка ЦФ1 та ЦФ2 відповідно у полосі пропускання.

Виконуючи деякі перетворення та враховуючи вхідні показники, отримаємо вираз для максимальної методичної похибки методу.

$$\Delta f_a = 20(\Delta K_1 + \Delta K_2). \quad (13)$$

Відповідно похибкам АЧХ фільтрів на рис. 6а та рис. 6б, методична похибка обчислення частоти буде складати не більше $\Delta f_a < 0.05$ Гц.

Результати перевірки методу при моделюванні підтверджують, що в інтервалі частот 42.5-57.5 Гц похибка не перевищує розраховане значення і складає 0.0053 Гц (рис. 7).

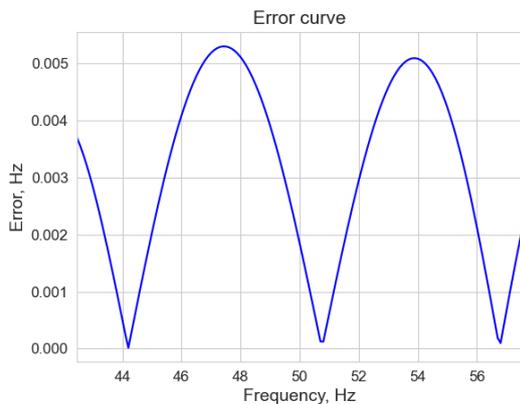


Рис. 7. Методична похибка обчислення частоти напруги в трифазній мережі

Після того, як зроблені всі попередні розрахунки, запишемо алгоритм обчислення частоти

напруги в трифазній електромережі, використовуючи словесну форму:

1. Ініціалізувати:

Вектор-рядок вхідних відліків сигналу:

$$\overline{Ua}(n) = [ua(n), ua(n-1), \dots, ua(n-K+1)],$$

$$\overline{Ub}(n) = [ub(n), ub(n-1), \dots, ub(n-K+1)],$$

$$\overline{Uc}(n) = [uc(n), uc(n-1), \dots, uc(n-K+1)].$$

На початку ініціалізуються нульовими значеннями.

Вектор-рядок коефіцієнтів ЦФ1 та ЦФ2, які розраховані у табл. 1: $\overline{H}_1(n) = [h_1(0), h_1(1), \dots, h_1(K-1)]$, $\overline{H}_2(n) = [h_2(0), h_2(1), \dots, h_2(K-1)]$.

$\overline{Ua}(n)$, $\overline{Ub}(n)$, $\overline{Uc}(n)$, $\overline{H}_1(n)$, $\overline{H}_2(n) \in \mathbb{R}^K$, K – кількість коефіцієнтів ЦФ, f_{\min} – мінімальне значення частоти, f_{\max} – максимальне значення частоти, K_{\max} – коефіцієнт передачі ЦФ.

2. Отримати наступні відліки фаз А, В, С і сформувати вектори $\overline{Ua}(n)$, $\overline{Ub}(n)$, $\overline{Uc}(n)$.

3. Отримати результати фільтрації ЦФ1:

$$\begin{cases} ua1(n) = \overline{H}_1(n) \cdot \overline{Ua}^T(n) \\ ub1(n) = \overline{H}_1(n) \cdot \overline{Ub}^T(n) \\ uc1(n) = \overline{H}_1(n) \cdot \overline{Uc}^T(n) \end{cases}$$

4. Отримати результати фільтрації ЦФ2:

$$\begin{cases} ua2(n) = \overline{H}_2(n) \cdot \overline{Ua}^T(n) \\ ub2(n) = \overline{H}_2(n) \cdot \overline{Ub}^T(n) \\ uc2(n) = \overline{H}_2(n) \cdot \overline{Ua}^T(n) \end{cases}$$

5. Знайти фазу з максимальним значенням:

$$p = \operatorname{argmax} \{ua2(n), ub2(n), uc2(n)\}.$$

6. Для обраної фази обчислити відносне значення частоти:

$$fr(n) = \frac{fn(n)}{fd(n)}$$

7. Обчислити абсолютне значення частоти електричної мережі:

$$f_a(n) = \left(\frac{(f_{\max} - f_{\min})f_r(n)}{K_{\max}} + f_{\min} \right)$$

8. Видати отриманий результат та завершити процедуру.

Для побудови комп'ютеризованих систем з каналом вимірювання частоти напруги трифазної електричної мережі необхідні датчики напруги змінного струму. Також у комп'ютеризованій системі повинен бути присутній антиалайзинговий фільтр. Хоча за допомогою ЦФ можна відфільтрувати завади та гармонічні складові, однак цього може бути недостатньо, враховуючі особливості КІХ-фільтрів.

Висновки. У роботі розглянуто алгоритм обчислення частоти напруги в трифазній елек-

тромаережі на базі цифрових фільтрів з кінцевою імпульсною характеристикою. Для фільтрації було запропоновано використати ЦФ з лінійною фазою. Існує чотири типи таких фільтрів. В результаті аналізу показано, що більш доцільно використати фільтри третього та четвертого типу в залежності від порядку ЦФ.

Для оптимізації коефіцієнтів фільтру обрано метод найменших квадратів. Результати розрахунку коефіцієнтів фільтрів показали, що запропонований алгоритм дозволяє отримати високу точність обчислення частоти напруги в трифазній електромережі при відносно невеликому порядку фільтрів. Так, при 30 порядку ЦФ методологічна похибка не перевищила 0.0053 Гц у смузі 42.5-57.5 Гц.

Перспективи подальших досліджень полягають у можливості мінімізації порядку фільтра, а також у вивченні питання накладання додаткових умов при синтезі цифрових фільтрів для зниження гармонійних складових (хоча у більшості випадків достатньо використання антиалайзингового фільтру у комп'ютеризованих систем).

Список літератури:

1. Тимохін О.В., Канабас Д.С. Методи визначення частоти синусоїдального сигналу електричної мережі. Міжнародний науково-технічний журнал "Сучасні проблеми електроенергетехніки та автоматики". 2020. С. 11–15.
2. Литвиненко В.М., Дощенко Г.Г., Самойлов М.О. Аналіз методів вимірювання частоти. *Біомедична інженерія та електроніка*. 2017. №. 1 (15). С. 63–83.
3. Xing J., Mu L. A fast and precise power system frequency estimation method without iterations. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*. 2020. V. 123. P. 106199. DOI: 10.1016/j.ijepes.2020.106199.
4. Djurišić Ž. R., Djurić M. B., Papić V. D. An algorithm for three-phase power system frequency measurement. *Electrical Engineering*. 2024. P. 1–12. DOI: 10.1007/s00202-024-02238-6.
5. Xiao D., Tan W., Zhang W. A practical method of real-time measurement for power system frequency. *Power System Protection and Control*. 2014. V. 42. P. 21–29.
6. Петросян Р.В. Вимірювач частоти електричної мережі на базі цифрових фільтрів. *Вісник ЖІТІ*. 2002. №3(22). С. 78–80.
7. Micheletti R. Real-time measurement of power system frequency. *Proceedings of IMEKO XVI World Congress*. 2000. P. 425–430.
8. ДСТУ EN 50160:2023. Характеристики напруги електропостачання в електричних мережах загальної призначеності (EN 50160:2022, IDT). БУДСТАНДАРТ Online – нормативні документи будівельної галузі України. URL: https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id_doc=106226 (дата звернення: 24.07.2024).
9. ГОСТ 13109-97. Електрична енергія. Сумісність технічних засобів електромагнітна. Норми якості електричної енергії в системах електропостачання загального призначення. БУДСТАНДАРТ Online – нормативні документи будівельної галузі України. URL: https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id_doc=25837 (дата звернення: 24.07.2024).
10. Manolakis D.G., Proakis J.G. *Digital signal processing*. London: Pearson, 2014. 1014 p.

Petrosian R.V. ALGORITHM FOR CALCULATING THE VOLTAGE FREQUENCY IN A THREE-PHASE POWER SYSTEM BASED ON DIGITAL FILTERS

The research article solves an important scientific and technical problem – minimizing the error in calculating the voltage frequency in a three-phase power system. The calculation of the voltage frequency is important because it helps to ensure the reliability and stability of power facilities. Long-term operation of equipment with a significant deviation of the voltage frequency of the three-phase power system from the

nominal value leads to increased wear and premature failure. The discrepancy between the voltage frequency and the nominal value can also lead to additional errors when measuring other parameters of power facilities. This article analyzes existing algorithms for measuring voltage frequency in power systems. One of the main disadvantages of most algorithms is the use of trigonometric functions that are sensitive to various kinds of errors. The proposed algorithm for calculating the voltage frequency in a three-phase power system is based on digital filtering. Digital filters are an important tool for signal processing and are widely used in various fields: power systems, acoustics, automation systems, image processing, etc. A special place in digital processing is occupied by nonrecursive digital filters (filters with a finite impulse response), which have a number of advantages over other types of filters, for example, it is possible to provide a linear phase-frequency response. In the work we proposed a structural scheme for calculating the voltage frequency based on these digital filters, and also performed their synthesis. To verify the obtained results, a computer simulation was performed using the Python programming language. Thus, the paper presents a comprehensive approach to solving the problem of minimizing the error in calculating the voltage frequency in a three-phase power grid, including both theoretical aspects and a practical implementation algorithm using modern digital technologies.

Key words: *algorithm for calculating the voltage frequency, voltage frequency error, three-phase electric power, digital filters, least squares method.*

Пундик В.І.

Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя

РОЗРОБКА ПРОГРАМНИХ СИСТЕМ В КОНТЕКСТІ ХМАРНИХ ТЕХНОЛОГІЙ З ВИКОРИСТАННЯМ МЕТОДОЛОГІЇ DEVOPS ТА ГНУЧКОЇ МОДЕЛІ РОЗРОБКИ

У даній роботі досліджується інтеграція методологій Agile та DevOps, зосереджуючись на їх подібності та перевагах у поєднанні. Agile сприяє ітераційній та поетапній розробці, надаючи невеликі часті випуски для швидкої адаптації до мінливих вимог. DevOps покращує співпрацю між командами розробки та операцій, наголошуючи на постійній інтеграції та безперервній доставці (CI/CD) і автоматизації.

Дослідження включає експериментальний проект для демонстрації функціональності гібридної моделі Agile DevOps. Проект складається з розробки хмарного веб-додатку для електронної комерції в три етапи: визначення вимог клієнта та створення резерву спринтів, розробка та тестування компонентів проекту та доставка кожного компонента клієнту.

Структура проекту включає вісімнадцять спринтів, кожен з яких зосереджений на різних модулях веб-додатку, таких як інтерфейсна розробка, автентифікація, керування продуктами, кошик для покупок, оформлення замовлення, профіль користувача. У статті докладно описано використання систем контролю версій (GitHub, GitLab), інструментів CI/CD (Jenkins, CircleCI), інструментів інфраструктури як коду (IaC) (Terraform, AWS CloudFormation) та інструментів моніторингу (Prometheus, Grafana) для ефективного розробки, тестування та розгортання.

Перша ітерація використовувала методологію Agile, призначаючи членів команди для окремих секторів розробки, тестування та розгортання. Спостереження показали, що хоча сектор розробки виконував завдання достроково, тестування та розгортання відставали, що свідчить про брак координації.

У другій ітерації було реалізовано гібридну методологію Agile DevOps із спільною роботою крос-функціональних команд. Такий підхід сприяв кращій координації та послідовному прогресу в усіх секторах, що призвело до покращення загальної продуктивності та своєчасного виконання завдань.

У статті робиться висновок, що гібридна методологія Agile DevOps покращує розробку проектів, сприяючи безперервній співпраці та інтеграції, зрештою виявляється більш ефективною, ніж традиційний підхід Agile.

Ключові слова: гнучка розробка, методологія DevOps, безперервна інтеграція/безперервна доставка, крос-функціональні команди, хмарна електронна комерція, інфраструктура як код.

Постановка проблеми. У сфері розробки програмного забезпечення, методології, що керують виконанням проекту, відіграють ключову роль у формуванні результатів. Команди в різних галузях постійно стикаються з проблемою ефективної доставки високоякісних програмних продуктів, які відповідають вимогам користувачів і ринків, що постійно змінюються. У відповідь на це з'явилася різноманітна низка методологій, кожна з яких пропонує унікальні рамки та принципи для керування процесами розробки.

Ці методології пропонують структуровані підходи до управління проектами, співпраці та доставки. Дане дослідження методологій розробки програмного забезпечення заглиблюється в стратегії та принципи, які забезпечують успішні

результати проекту. Від початку до реалізації досліджуються нюанси управління проектами розробки в сучасному динамічному ландшафті, з оглядом на підходи, які дозволяють командам прогресувати в сфері розробки програмного забезпечення, що постійно розвивається.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. У науково-дослідницькому просторі сьогодення з'являються роботи, присвячені винаходу та аналізу методологій по створенню методів та моделей розробки програмних систем із використанням хмарних технологій.

У роботі [1] було проведено дослідження щодо поєднання DevOps з методологією бережливої розробки програмного забезпечення (Lean Software Development). Це дослідження предста-

вило Lean Software Development як методологію, яка зосереджена на зменшенні відходів і постійному вдосконаленні, а DevOps було представлено як набір практик, спрямованих на покращення загального життєвого циклу розробки шляхом інтеграції розробки та операцій разом у багатофункціональних командах. Метод дослідження передбачає впровадження практик DevOps для усунення виявлених прогалин у ошадливій розробці програмного забезпечення. Цей метод зміг використати практики DevOps для подолання проблем ошадливої розробки програмного забезпечення в різних сферах, включаючи затримки, дефекти, додаткові функції, перемикавання завдань тощо. Обмеження цієї роботи полягає в тому, що застосування принципів DevOps для подолання існуючих проблем мало бути перевірено лише за допомогою Lean Software Development, а дослідження подібних випадків застосування принципів DevOps для Scrum, XP та інших методів було залишено як перспективи для майбутніх досліджень.

У роботі [2] приділяється увага об'єднанню DevOps зі штучним інтелектом. У статті підкреслюється альтернативна вартість, пов'язана з переходом від ліцензування програмного забезпечення до програмного забезпечення як послуги (Software as Service – SaaS), і підкреслюються переваги, отримані завдяки ранньому та регулярному випуску програмного забезпечення організаціями, які прийняли цю практику. DevOps представляється як революційний підхід, спрямований на усунення прогалин у двох центральних процесах, а саме розробці та експлуатації. Нові технології, які включають великі дані та хмарні обчислення, вимагають швидкого розгортання програмного забезпечення, яке досягається завдяки використанню концепцій безперервної інтеграції (CI) і безперервної доставки (CD), вказуючи на економічну ефективність і роль автоматизації у виробничому процесі.

Крім того, варто зазначити праці наступних науковців: Доріс Л., Поттер К., [3], Аль Масуд С., Маснун М., Султан А., Ахмед Ф., Бегум Н. [4], Гантус Г., Гілл А. [5], Мохаммад С. М. [6], Алмейда Ф., Сімоєш Х., Феррейра Лопес С. Ф. [7], Россберг Дж. [8], Гупта К., Фернандес-Креует Х. М., Гупта Ст [9], Нгуен Т., Хюїнь Т., Тран Л. [10], Арімура Ю., Іто М. [11], Чженлун П., Чжунхуей О., Юлан Х. [12], Хан Х., Алі Ф., Назір С. [13], Огала Дж., Мугеле С. [14], Паніграхі До., Молл Р., Паті Б. [15], Ся Ф. [16], Одун-Айо І., Адесола Ф., Семюел Ст [17] та інших.

Проте, беручи до уваги вище зазначену наукову документацію, питання, пов'язане з методологією по створенню методів та моделей розробки програмних систем із використанням хмарних технологій, все ще залишається недостатньо дослідженим та потребує подальшого опрацювання.

Постановка завдання. Метою роботи є створення методів та моделей розробки програмних систем із використанням хмарних технологій.

Виклад основного матеріалу дослідження. Гнучка модель розробки (Agile) та методологія DevOps (Development & Operations – Розробка і операції) являють собою концепції з певними відмінностями, які насамперед полягають у тому, що Agile представляються як спільний та ітеративний підхід до розробки програмного забезпечення, який зосереджується на постачанні невеликих поетапних випусків, що забезпечує гнучкість і швидку адаптацію до мінливих вимог, а DevOps, з іншого боку, відповідає набір практик, які спрямовані на покращення співпраці та зв'язку між командами розробки та операцій, сприяючи культурі постійної інтеграції та безперервної доставки (CI/CD – continuous integration, continuous delivery) і автоматизації.

Тим не менш, обидві концепції мають ряд ключових спільних характеристик, які дозволяють комбіновану інтеграцію у процес розробки. Насамперед, серед спільностей, найважливішою виявляється ітеративна та поетапна розробка, яка полягає у тому, що як Agile, так і DevOps виступають за поділ роботи на менші, керовані кроки. Цей ітеративний підхід дозволяє командам збирати відгуки на ранній стадії та часто, забезпечуючи швидку адаптацію до мінливих вимог і динаміки ринку. Окрім того, обидві концепції співпраці та спільній відповідальності між командами, включаючи розробників, тестувальників, інженерів з експлуатації та інших зацікавлених сторін. Також, не менш важливі фундаментальні риси Agile та DevOps проявляються у важливості постійного вдосконалення та циклах зворотного зв'язку протягом життєвого циклу розробки програмного забезпечення.

При використанні гібридної моделі Agile DevOps організуються крос-функціональні команди, до складу яких входять члени з різними наборами навичок. Крос-функціональні команди сприяють співпраці, спільному володінню та колективній відповідальності та можуть працювати в суміжних приміщеннях або віртуально, використовуючи інструменти та технології співпраці для ефективного спілкування та координації.

Реалізація гібридної моделі розробки Agile DevOps підтримується набором інструментів і практик, призначених для оптимізації співпраці, автоматизації процесів і підвищення загальної ефективності проекту. У своїй основі ця методологія наголошує на безперервній інтеграції команд розробки та операцій.

Системи контролю версій, такі як платформи Git, GitHub і GitLab, служать основою спільної розробки. Дозволяючи командам відстежувати зміни та ефективно керувати сховищами коду, ці платформи сприяють безперервній співпраці та процесам перевірки коду, що важливо для підтримки якості коду та узгодженості в робочих процесах Agile DevOps.

Інструменти безперервної інтеграції та доставки (CI/CD) автоматизують процес створення, тестування та розгортання змін програмного забезпечення, дозволяючи командам швидко та надійно надавати високоякісний код. Популярні інструменти CI/CD (Continuous Integration/Delivery), як-от Jenkins, CircleCI, Travis CI та GitLab CI/CD, оптимізують створення конвеєрів розгортання, забезпечуючи ретельне тестування змін коду та безпроблемне розгортання у виробничих середовищах.

Інструменти «Інфраструктура як код» (Infrastructure as Code – IaC), такі як Terraform, AWS CloudFormation і Ansible, дозволяють командам програмно надавати і керувати ресурсами інфраструктури за допомогою декларативних файлів конфігурації. Розглядаючи інфраструктуру як код, команди можуть досягти узгодженості, повторюваності та масштабованості під час створення

хмарних середовищ, спрощуючи керування та автоматизуючи зміни інфраструктури відповідно до принципів Agile DevOps.

Інструменти моніторингу та спостереження, зокрема Prometheus, Grafana та стек ELK (Elasticsearch, Logstash, Kibana), відіграють вирішальну роль у підтримці продуктивності та надійності програм у виробничих середовищах. Ці інструменти дають змогу командам контролювати ключові показники продуктивності, відстежувати працездатність системи та аналізувати дані журналу в реальному часі, полегшуючи проактивне виявлення проблем, усунення несправностей та оптимізацію продуктивності для забезпечення позитивної взаємодії з користувачем.

По суті, інтеграція цих інструментів і методів у методологію Agile DevOps сприяє спільному, автоматизованому та керованому даними підходу до розробки програмного забезпечення та операцій. Ефективно використовуючи ці технології, команди можуть прискорити цикли доставки, покращити якість продукції та швидко адаптуватися до мінливих вимог, сприяючи безперервним інноваціям і доставці цінностей у середовищі розробки хмарного програмного забезпечення.

Наступним чином були сформульовані вимоги щодо структури проекту, схематичне зображення яких представлено на рисунку 1.

Вимоги, що описують структуру проекту перетворюються в результати в беклог спринту, що складається з вісімнадцяти спринтів для кожного модуля веб-додатку з трьома-чотирма сторінками, що позначають функції модуля, як показано в таблиці 1.

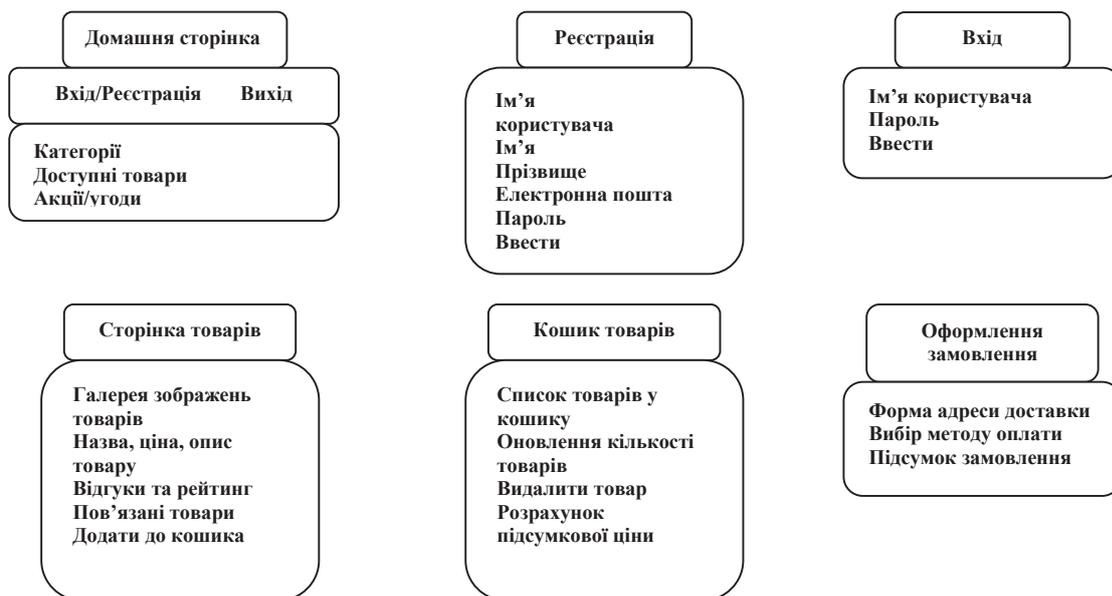


Рис. 1. Діаграма вимог до експериментального проекту

Беклог вимогу експериментального проекту

| Спринт | Опис спринта | Сторі-поінт | Опис сторі-поінта |
|--------|-----------------------|-------------|-----------------------------------|
| 1 | Фронт-енд | 1 | Структура фронт-енд системи |
| | | 2 | Дизайн фронт-енд системи |
| | | 3 | Навігація через фронт-енд систему |
| | | 4 | Сторінка зі списком товарів |
| 2 | Автентифікація | 5 | Ресстрація |
| | | 6 | Вхід |
| | | 7 | Функція «забув пароль» |
| | | 8 | Вихід |
| 3 | Менеджмент товарів | 9 | Додати товар |
| | | 10 | Редагувати товар |
| | | 11 | Видалити товар |
| | | 12 | Сторінка з інформацією про товар |
| 4 | Купувальний кошик | 13 | Додати до кошика |
| | | 14 | Видалити з кошика |
| | | 15 | Показати кошик |
| 5 | Оформлення замовлення | 16 | Заповнення форми адреси доставки |
| | | 17 | Вибір методу оплати |
| | | 18 | Підсумок замовлення |

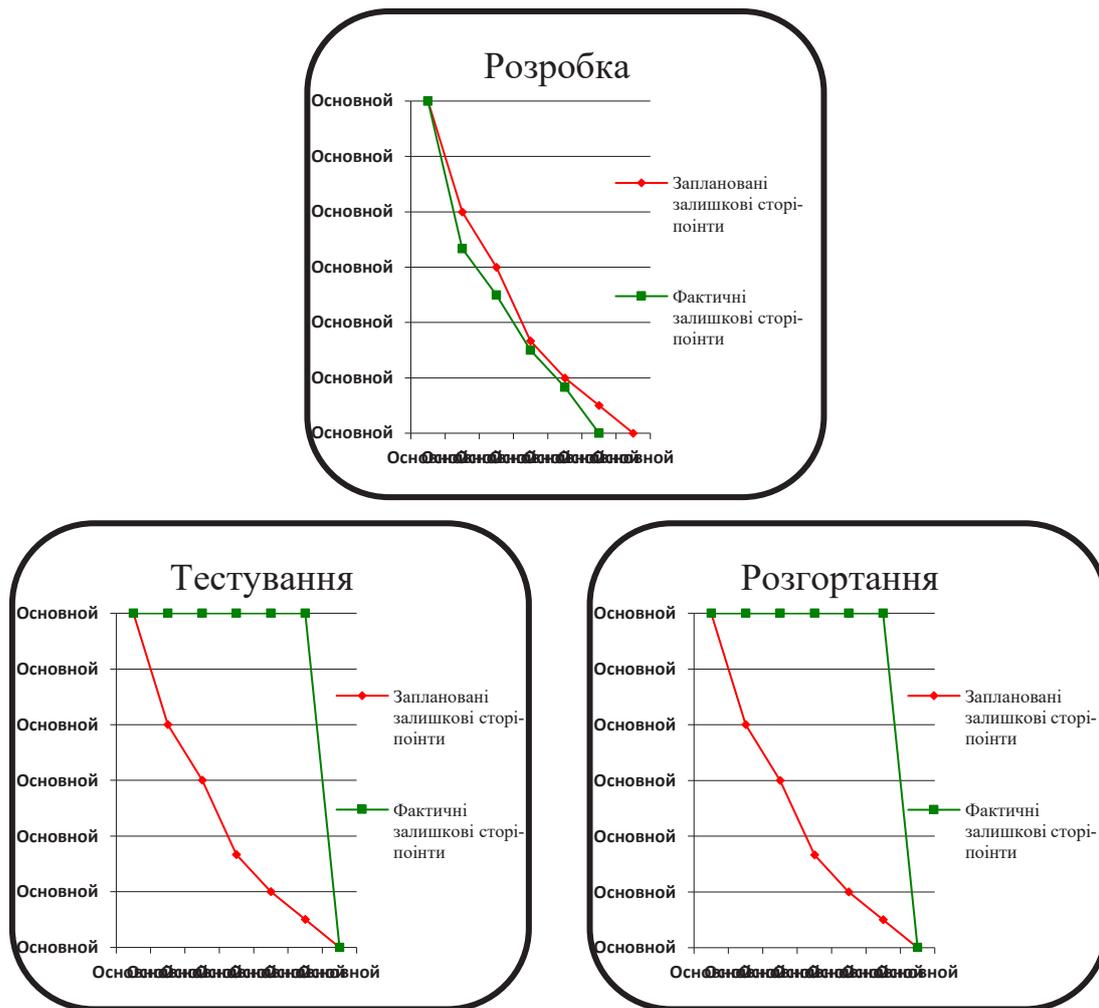


Рис. 2. Серія діаграм згорання задач з використанням методології Agile

Під час першої ітерації використовувалася методологія Agile, з метою призначення членам команди працювати окремо над секторами розробки, тестування та розгортання протягом семи днів. Спостережувані дані каталогізувалися щодо продуктивності та прогресу у формі діаграм згоряння задач, що відображають фактичні та залишкові сторі-поінти у протигагу кількості днів, що пройшли. Діаграми цієї ітерації, які зображені на рисунку 2, відстежують ефективність секторів розробки, тестування та доставки за допомогою методології Agile.

На першій діаграмі цієї ітерації, видно, що кількість залишкових сторі-поінтів, постійно залишалася нижчою за очікувану їх кількість, що залишилися протягом усього проекту, і розробка була завершена до передбачуваного терміну на сьомий день, тобто що сектор розвитку працював краще, та закінчував раніше, ніж очікувалося. З іншої сторони, аналізуючи другу та третю діа-

граму серії, виявляється, що фактичні сторі-поінти, взагалі не зменшилися до останнього дня. Це означає, що сектори тестування та розгортання не змогли досягти жодного прогресу до завершення сектору розробки на шостий день, що свідчить про те, що спостережувана продуктивність не відповідає оціночним стандартам.

З цієї причини для наступної ітерації використовувалася гібридна методологія DevOps Agile, де члени крос-функціональних команд працювали разом протягом семи днів. Це призвело до безперервної співпраці та кооперації між членами команди, що дозволило скоординувати сектори розробки, тестування та розгортання без виконання високих вимог до навичок повного переходу на DevOps. Серія діаграм з використання даної методології зображена на рисунку 3.

На першій діаграмі ітерації з використанням методології DevOps Agile видно, що сектор розробки показав кращі результати, ніж очікувалося,

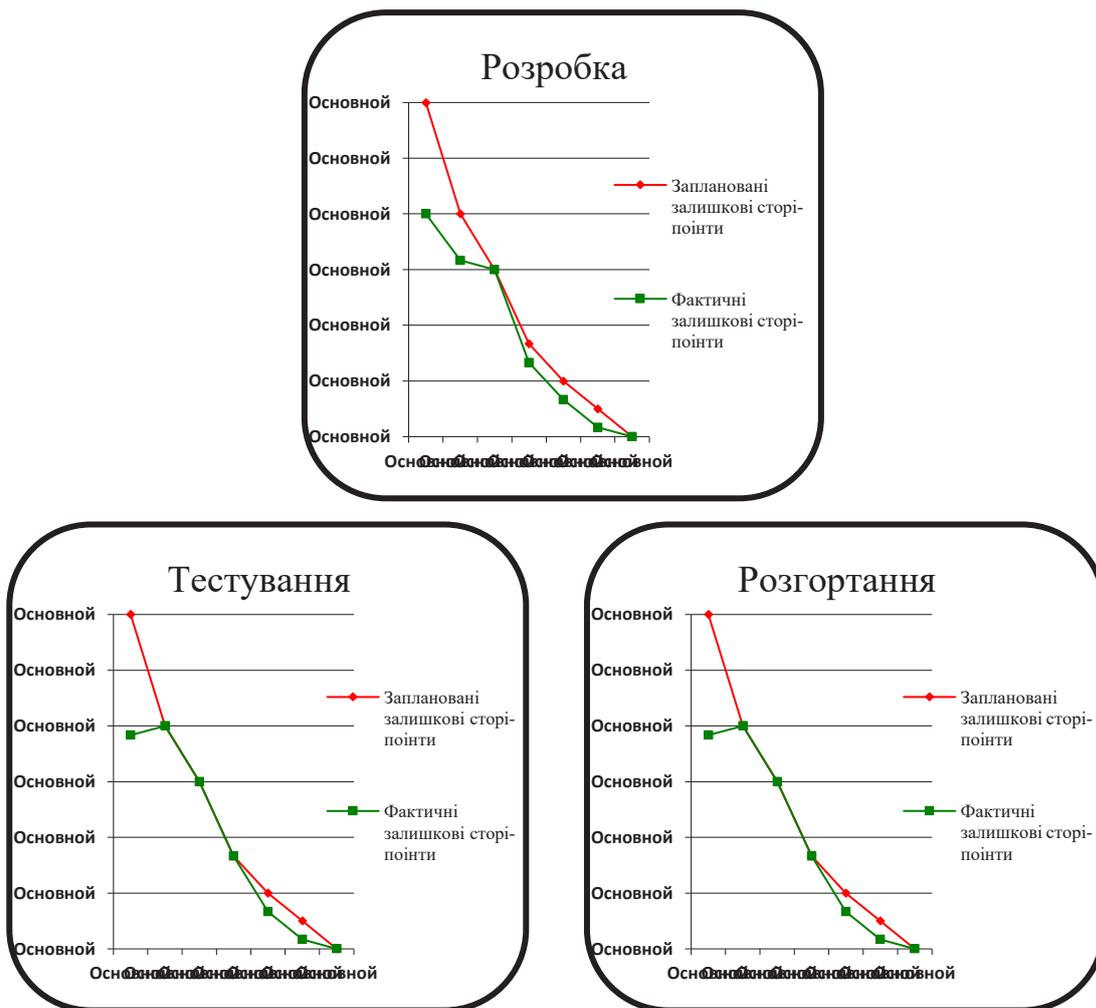


Рис. 3. Серія діаграм згоряння задач з використанням гібридної методології DevOps Agile

подібно до попередньої ітерації, демонструючи швидший прогрес протягом усього проекту та досягнення завершення раніше розрахункового терміну. На другій і третій діаграмах цієї ітерації, виявляється, що фактичні залишкові сторі-поінти, які відповідають роботі секторів тестування та розгортання, здебільшого залишилися нижче оцінених сторі-поінтів, і досягли завершення раніше запланованого. Це означає, що сектори тестування та розгортання показали кращі результати, що призвело до послідовного та ефективного прогресу цілей проекту та завершення секторів тестування та розгортання до розрахункового терміну.

Таким чином, реалізацію експериментального проекту було завершено з використанням як методології Agile, так і методології DevOps Enabled Agile з діаграмами згоряння задач, створеними для обох ітерацій, що дозволило провести глибоке порівняння їх продуктивності, щоб визначити, що методологія DevOps Enabled Agile є кращою з точки зору прогресування у розробці проекту.

Висновки. Загалом, імплементація гібридної моделі Agile DevOps дозволяє організаціям прискорити час виходу на ринок шляхом оптимізації

процесів розробки, тестування та розгортання та скорочення часу. Конвеєри CI/CD автоматизують процес створення, тестування та розгортання змін програмного забезпечення, дозволяючи організаціям випускати нові функції та оновлення швидко та надійно. Методологія гнучкої розробки наголошує на ітераційних циклах розробки та частому зворотному зв'язку від зацікавлених сторін, що дозволяє командам повторювати функції продукту та включати відгуки користувачів на ранній стадії, що сприяє швидкому виходу на ринок. Інфраструктура як код дозволяє організаціям програмно надавати ресурси інфраструктури та керувати ними, скорочуючи час і зусилля, необхідні для розгортання та масштабування програм у динамічних хмарних середовищах.

У підсумку, імплементація у розробку експериментального проекту гібридної методології Agile DevOps із спільною роботою крос-функціональних команд, продемонструвала, що даний метод сприяє кращій координації та послідовному прогресу в усіх секторах, що призводить до покращення загальної продуктивності та своєчасного виконання завдань.

Список літератури:

1. Farid A. B., Helmy Y. M., Bahloul M. M. Enhancing Lean Software Development by using Devops Practices. *International Journal of Advanced Computer Science and Applications (IJACSA)*. 2017. № 8.7. URL: <https://thesai.org/Publications/ViewPaper?Volume=8&Issue=7&Code=IJACSA&SerialNo=36> (accessed 26.06.2024)
2. Vemuri, Naveen & Thaneeru, Naresh & Tatikonda, Venkata. (2024). AI-Optimized DevOps for Streamlined Cloud CI/CD. *International Journal of Innovative Science and Research Technology*. 9. 7. 10.5281/zenodo.10673085.
3. Doris L., Potter K. Agile DevOps Practices: Implement agile and DevOps methodologies to streamline development, testing, and deployment processes. *Software*. 2024.
4. Al Masud S., Masnun M., Sultana A., Ahmed F., Begum N. DevOps Enabled Agile: Combining Agile and DevOps Methodologies for Software Development. *International Journal of Advanced Computer Science and Applications*. 2022. № 13. DOI:10.14569/IJACSA.2022.0131131.
5. Ghantous G., Gill A. An Agile-DevOps Reference Architecture for Teaching Enterprise Agile. *International Journal of Learning, Teaching and Educational Research*. 2019. № 18. P. 128-144. DOI:10.26803/ijlter.18.7.9.
6. Mohammad S. M. DevOps automation and Agile methodology. *SSRN Electronic Journal*. 2017. № 5. P. 946-949. DOI:10.1729/Journal.24060.
7. Almeida F., Simoes J., Ferreira Lopes S. F. Exploring the Benefits of Combining DevOps and Agile. *Future Internet*. 2022. № 14. 63 p. DOI:10.3390/fi14020063.
8. Rossberg J. Agile Project Management with Azure DevOps: Concepts, Templates, and Metrics. 2019. DOI:10.1007/978-1-4842-4483-8.
9. Gupta C., Fernández-Crehuet J. M., Gupta V. Citation: Measuring Impact of Cloud Computing and Knowledge Management in Software Development and Innovation. *Systems*. 2022. № 10. 151p. DOI:10.3390/systems10050151.
10. Nguyen T., Huynh T., Tran L. Agile Software Development with Cloud Computing. 2023. DOI:10.13140/RG.2.2.15440.99842.
11. Arimura Y., Ito M. Cloud Computing for Software Development Environment -In-house Deployment at Numazu Software Development Cloud Center. *Fujitsu scientific & technical journal*. 2011. № 47. P. 325-334.
12. Zhenlong P., Zhonghui O., Youlan H. The Application and Development of Software Testing in Cloud Computing Environment. 2012. P. 450-454. DOI:10.1109/CSSS.2012.119.
13. Khan H., Ali F., Nazir S. Systematic analysis of software development in cloud computing perceptions. *Journal of Software: Evolution and Process*. 2022. № 36. DOI:10.1002/smr.2485.

14. Ogala J., Mughele S. Agile Software Development Methodologies in Cloud Computing. № 1. 2022. P. 67-80. DOI:10.22624/AIMS/REBK2022-P7.
15. Panigrahi C., Mall R., Pati B. Software Development Methodology for Cloud Computing and Its Impact. 2021. DOI:10.4018/978-1-7998-3016-0.ch008.
16. Xia F. GIS Software Product Development Challenges in the Era of Cloud Computing. 2022. DOI:10.1007/978-981-19-3816-0_15.
17. Odun-Ayo I., Adesola F., Samuel V. Cloud Computing and Open Source Software - Issues and Developments. 2018. URL: https://www.iaeng.org/publication/IMECS2018/IMECS2018_pp140-145.pdf (accessed 26.06.2024)

Pundyk V.I. SOFTWARE SYSTEMS DEVELOPMENT IN THE CONTEXT OF CLOUD TECHNOLOGIES USING THE DEVOPS METHODOLOGY AND AGILE DEVELOPMENT

This paper explores the integration of Agile and DevOps methodologies, focusing on their similarities and benefits when combined. Agile promotes iterative and incremental development, providing small, frequent releases to quickly adapt to changing requirements. DevOps improves collaboration between development and operations teams by emphasizing continuous integration and continuous delivery (CI/CD) and automation.

The research includes a pilot project to demonstrate the functionality of the hybrid Agile DevOps model. The project consists of developing a cloud-based web-based e-commerce application in three stages: defining client requirements and creating a sprint pool, developing and testing project components, and delivering each component to the client.

The project structure includes eighteen sprints, each of which focuses on different modules of the web application, such as front-end development, authentication, product management, shopping cart, checkout, user profile. The article describes in detail the use of version control systems (GitHub, GitLab), CI/CD tools (Jenkins, CircleCI), infrastructure-as-code (IaC) tools (Terraform, AWS CloudFormation), and monitoring tools (Prometheus, Grafana) for efficient development, testing, and deployment.

The first iteration utilized the Agile methodology, assigning team members to specific sectors of development, testing, and deployment. Observations showed that while the development sector was completing tasks ahead of schedule, testing and deployment lagged behind, indicating a lack of coordination.

In the second iteration, a hybrid Agile DevOps methodology was implemented with cross-functional teams working together. This approach facilitated better coordination and consistent progress across all sectors, resulting in improved overall productivity and timely delivery of tasks.

The article concludes that the hybrid Agile DevOps methodology improves project development by facilitating continuous collaboration and integration, ultimately proving to be more effective than the traditional Agile approach.

Key words: agile development, DevOps methodology, continuous integration/continuous delivery, cross-functional teams, cloud e-commerce, infrastructure as code.

Регада Ю.О.

Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут»

Регада В.О.

Харківський національний економічний університет імені Семена Кузнеця

КЛЮЧОВІ ПРОБЛЕМИ ВИКОРИСТАННЯ ВЕЛИКИХ ДАНИХ В ІНФОРМАЦІЙНИХ СИСТЕМАХ НА СУЧАСНОМУ ЕТАПІ РОЗВИТКУ

На сучасному етапі розвитку роль Big Data (великих даних) набуває парадигмального значення, трансформуючи підходи до аналізу інформації та прийняття рішень у різноманітних сферах людської діяльності. Ця технологія, що характеризується обробкою та аналізом масивних обсягів структурованих і неструктурованих даних, стає ключовим фактором інноваційного розвитку та конкурентоспроможності.

У бізнес-середовищі Big Data уможливує глибше розуміння поведінки споживачів, оптимізацію операційних процесів та прогнозування ринкових тенденцій. Це призводить до підвищення ефективності маркетингових стратегій, покращення клієнтського досвіду та розробки інноваційних продуктів і послуг.

У науковій сфері великі дані відкривають нові горизонти для досліджень, дозволяючи аналізувати комплексні системи та виявляти приховані закономірності. Це особливо важливо в галузях геноміки, астрономії, кліматології та соціальних наук, де обробка великих масивів даних є критичною для наукового прогресу.

В охороні здоров'я Big Data сприяє розвитку персоналізованої медицини, ранньої діагностики захворювань та оптимізації лікувальних процесів. Аналіз великих обсягів медичних даних дозволяє виявляти фактори ризику, прогнозувати епідемії та розробляти ефективніші методи лікування.

У сфері державного управління технології Big Data підвищують ефективність надання публічних послуг, оптимізують процеси прийняття рішень та сприяють розвитку "розумних міст". Це дозволяє більш ефективно розподіляти ресурси та реагувати на потреби громадян.

Водночас, широке застосування Big Data породжує низку етичних, правових та технічних викликів, зокрема щодо захисту приватності, забезпечення безпеки даних та подолання "цифрового розриву". Вирішення цих проблем вимагає комплексного підходу, що поєднує технологічні інновації, розробку відповідної нормативно-правової бази та етичних стандартів.

Таким чином, роль Big Data на сучасному етапі розвитку полягає у створенні нових можливостей для інновацій, підвищенні ефективності процесів у різних сферах та формуванні основи для прийняття більш обґрунтованих рішень. Це сприяє загальному прогресу суспільства, стимулюючи економічне зростання та покращення якості життя.

Ключові слова: Big Data, великі дані, аналітики, аналіз даних, проблеми в сфері аналізу даних.

Постановка проблеми. У контексті сучасного розвитку, великі дані (Big Data) набули фундаментального значення, трансформуючи методологічні підходи до аналізу та прийняття рішень у різноманітних сферах людської діяльності. Ця технологія уможливує обробку та інтерпретацію масивних обсягів структурованої та неструктурованої інформації, що генерується з безпрецедентною швидкістю та варіативністю.

Значимість великих даних полягає в їхній здатності виявляти взаємозв'язок та кореляції, недоступні при традиційних методах аналізу. Це призводить до підвищення точності прогнозування та

оптимізації процесів прийняття рішень у бізнесі, науці, охороні здоров'я та державному управлінні.

Однак, імплементація технологій великих даних супроводжується низкою етичних та правових викликів, зокрема щодо забезпечення конфіденційності та захисту персональних даних. Це актуалізує необхідність розробки адекватних нормативно-правових механізмів регулювання даної сфери.

Таким чином, великі дані постають як ключовий фактор інноваційного розвитку, стимулюючи економічне зростання та науково-технічний прогрес, водночас породжуючи нові соціальні та

етичні дилеми, що потребують комплексного між-дисциплінарного осмислення.

У контексті стрімкого розвитку інформаційних технологій та цифровізації суспільства, використання великих даних в інформаційних системах набуває критичного значення. Однак, незважаючи на очевидні переваги, ця технологія стикається з низкою фундаментальних проблем, що потребують ґрунтовного наукового аналізу та вирішення.

Зокрема, актуалізуються питання забезпечення якості та релевантності даних, їх ефективного зберігання та обробки в умовах експоненціального зростання обсягів інформації. Не менш важливими є проблеми захисту конфіденційності та безпеки даних, особливо в контексті посилення кіберзагроз.

Окрему увагу слід приділити етичним аспектам використання великих даних, зокрема питанням прозорості алгоритмів та потенційної дискримінації при автоматизованому прийнятті рішень.

Вирішення цих проблем вимагає комплексного міждисциплінарного підходу, що охоплює технологічні, правові, етичні та соціальні аспекти. Це зумовлює необхідність подальших досліджень та розробки нових методологічних підходів до управління великими даними в інформаційних системах.

Аналіз останніх досліджень та публікацій. Дане питання є доволі дискусійним серед сучасних науковців. Великі дані вивчаються в рамках багатьох наукових праць. Так, М. Дзямулич, Т. Шматковська, О. Борисюк [1] досліджували значення великих даних у розвитку цифрової економіки, аналізуючи їх вплив на економічні процеси, ефективність бізнесу та інновації. В той же час М. Конюш [2] аналізував правові аспекти використання великих даних, зокрема ризики, пов'язані з дискримінацією, що можуть виникати через некоректне використання даних. Н. Коротун [3] вивчав сучасну модель інформаційного аналітика в контексті розвитку технологій великих даних в Україні, досліджуючи необхідні навички та компетенції для роботи в цій сфері.

В свою чергу О. Радутний [4] досліджував поняття, ознаки та виклики, пов'язані з великими даними, з кримінально-правової точки зору, акцентуючи на правових проблемах та викликах, що виникають у цій сфері. І. Станкевич, Г. Сакун, О. Сакун [5] розглядали соціально-економічний феномен великих даних у стратегіях цифрового маркетингу, аналізуючи їх вплив на маркетингові стратегії та практики.

В той же час О. Усата, Д. Іванов [6] описують основи роботи з великими даними, розглядаючи

базові концепції та методи обробки великих обсягів інформації. При цьому Г. Хаханова [7] пропонує векторний метод пошуку послідовностей у великих даних, аналізуючи ефективність цього підходу для обробки та аналізу великих обсягів інформації.

А. Фарухі, І. Ель Алауї, Ю. Гахі, А. Амін [8] розглядали монетизацію великих даних на всіх етапах ланцюжка створення вартості, аналізуючи різні методи і стратегії для перетворення даних на економічну цінність. Дж. Лу, А. Лю, Ю. Сун, Г. Чжан [9] вивчали підтримку прийняття рішень на основі даних в умовах зміни концепцій у потокових великих даних, аналізуючи методи адаптації до динамічних змін даних. К. Макнілі, Л. Шинтлер [10] висвітлювали основні концепції великих даних, їх значення та вплив на різні сфери діяльності, аналізуючи основні тенденції та перспективи розвитку.

А. Шакір, Д. Штагеманн, М. Волк, Н. Джамус, К. Туровський [11] пропонують концепцію побудови архітектури великих даних на основі мікросервісів, досліджуючи переваги та виклики цього підходу. Дж. Янг [12] аналізував майбутнє урбаністичної екології у контексті великих даних, розглядаючи, як дані можуть бути використані для покращення міського планування та екологічного менеджменту.

Постановка завдання. Метою даної роботи є систематизація ключових проблеми використання великих даних в інформаційних системах на сучасному етапі розвитку.

Виклад основного матеріалу. Термін «Великі Дані» (Big Data) увійшов до числа загальнозживаних економічних термінів приблизно з 2010 року, коли експерти почали відзначати експоненціальну швидкість, з якою генеруються дані, насамперед за допомогою соціальних мереж. При цьому Великі дані не можна визначити суто з точки зору їх розміру. І хоча насправді обсяг даних за останнє десятиліття збільшився на порядок, інші фактори також змінили весь інформаційний ландшафт. Як зазначає Д. Хардінг, «Великі дані – це не просто більша версія вже доступних даних. Насправді кращим терміном для розуміння сутності великих даних є глибокі дані. Ці дані досягають своєї глибини завдяки нашаруванню багатьох джерел інформації та дозволяють пов'язувати ці рівні між окремими людьми [1].

Донедавна через брак технічних та інших можливостей загальний обсяг здобутої інформації примусово скорочувався до зручного мінімуму і вже потім піддавався відповідній обробці. Сьо-

годні є можливість збирати та обробляти (аналізувати, використовувати з первинною метою, зберігати, повторно аналізувати та використовувати тощо) всю інформацію, яку тільки є можливим залучити в процес. Фактично стають непотрібними вибірки, за допомогою яких раніше вирішували проблему відносної об'єктивності висновків, адже завдяки феномену Великих Даних з'являється можливість досліджувати дійсно повний обсяг інформації замість його окремої репрезентативної частини. Відмова від вибірок усуває ще один їх недолік, крім неповноти, що полягає у необхідності формування нового набору даних тоді, коли змінюється мета або виникає нова, і це вимагає витрачання додаткових ресурсів і зусиль з збирання і обробки інформації [4].

Концепція великих даних базується на фундаментальних принципах, що визначають її сутність та функціональні можливості в контексті сучасних інформаційних систем. Ці принципи, відомі як «5V», включають [2, 6, 8-12]:

- Volume (обсяг), що характеризує безпрецедентні масштаби даних;
- Velocity (швидкість), яка відображає динаміку генерації та обробки інформації;
- Variety (різноманітність), що вказує на гетерогенність типів та джерел даних;
- Veracity (достовірність), яка акцентує увагу на проблемі забезпечення точності та надійності інформації;
- Value (цінність), що підкреслює потенціал даних для створення економічної вартості. Ці принципи формують концептуальну основу для розуміння та роботи з великими даними, визначаючи ключові характеристики та виклики, пов'язані з управлінням та аналізом масивних інформаційних потоків у цифровому середовищі. Вони також окреслюють парадигмальні зміни в підходах до обробки та інтерпретації даних, що мають значний вплив на розвиток інформаційних технологій та прийняття рішень у різних сферах людської діяльності.

Принцип технології big data полягає в тому, щоб надати користувачам якомога більше інформації про будь-який предмет або явище. Завдання такого аналізу даних – проаналізувати всі переваги та недоліки, щоб прийняти правильне рішення. В інтелектуальних машинах на основі різних типів інформації будуються моделі майбутнього, моделюються різні варіанти та відстежуються результати. Джерелами даних виступають інтернет-блоги, соцмережі, сайти, ЗМІ та різноманітні форуми, транзакції, бази даних; показання метеорологічних приладів, супутників, датчики стільникового зв'язку, інтернет речей (IoT) та підключені до нього пристрої, статистика міст і держав про переміщення, народжуваність та смертність, медичні дані [3-5, 7].

Імплементация технологій великих даних зумовлює значний позитивний вплив на різноманітні аспекти суспільного розвитку. У сфері бізнесу вона сприяє оптимізації операційних процесів, підвищенню ефективності маркетингових стратегій та покращенню клієнтського досвіду через персоналізацію послуг. В галузі охорони здоров'я великі дані уможливають прецизійну медицину, прогнозування епідемій та розробку інноваційних методів лікування.

У науково-дослідній сфері ця технологія прискорює процес наукових відкриттів, дозволяючи аналізувати величезні масиви даних для виявлення нових закономірностей. У державному управлінні великі дані сприяють підвищенню ефективності публічних послуг та розробці обґрунтованої політики. Крім того, вони відіграють ключову роль у розвитку розумних міст, оптимізації транспортних систем та підвищенні енергоефективності, що в сукупності призводить до покращення якості життя населення та сталого розвитку суспільства.

У той же час слід розуміти, що впровадження даної концепції на сучасному етапі розвитку світової економічної системи пов'язано із певними труднощами, а швидкість імплементации технологій гальмують певні проблеми, відповідно до дослідницької проблематики даної наукової статті розглянемо дану проблематику (рис. 1).

Розглянемо більш детально вищенаведену проблематику в сфері використання великих даних в інформаційних системах на сучасному етапі розвитку. У контексті експоненціального зростання обсягів інформації, проблема забезпечення якості та достовірності даних набуває критичного значення. Ця проблематика охоплює аспекти точності, повноти, актуальності та несуперечливості даних. Неякісні або недостовірні дані можуть призвести до хибних висновків та неефективних рішень, що потенційно має значні негативні наслідки. Відтак, розробка та імплементация методології верифікації та валідації даних стає імперативом для ефективного функціонування систем великих даних.

Проблема масштабованості систем зберігання та обробки великих даних є фундаментальним викликом у контексті їх експоненціального зростання. Ця проблематика охоплює технічні та архітектурні аспекти проектування інфраструктури,

здатної ефективно адаптуватися до збільшення обсягів даних без втрати продуктивності. Вона також включає питання оптимізації алгоритмів обробки та аналізу для забезпечення їх ефективності при роботі з масивними датасетами. Вирішення цієї проблеми вимагає інноваційних підходів до розподілених обчислень та зберігання даних.



Рис. 1. Ключові проблеми використання великих даних в інформаційних системах на сучасному етапі розвитку

Джерело: розроблено авторами за [1-12]

У рамках використання великих даних, проблема захисту конфіденційності та персональних даних набуває особливої актуальності. Ця проблематика охоплює технічні, правові та етичні аспекти забезпечення приватності індивідів при збиранні, зберіганні та аналізі їх персональної інформації. Вона включає розробку методів анонізації та псевдонімізації даних, впровадження принципів «privacy by design» та «privacy by default», а також забезпечення прозорості процесів обробки даних для користувачів.

Проблема інтеграції гетерогенних джерел даних у контексті Big Data характеризується

складністю узгодження різнорідних форматів, структур та семантики інформації. Ця проблематика вимагає розробки ефективних методологій та інструментів для агрегації, нормалізації та уніфікації даних з різноманітних джерел, забезпечуючи їх сумісність та інтероперабельність для подальшого аналізу та використання в інформаційних системах.

Забезпечення поточної обробки та аналізу великих даних полягає у необхідності обробки та інтерпретації масивних потоків інформації в режимі реального часу. Ця задача вимагає розробки високоефективних алгоритмів та архітектури, здатних здійснювати швидкий аналіз даних без значних затримок. Вирішення цієї проблеми є критичним для систем, що потребують миттєвого реагування на зміни у даних.

Проблема етичних аспектів використання великих даних охоплює питання справедливості, прозорості та відповідальності при застосуванні аналітичних систем. Ця проблематика включає запобігання дискримінації, забезпечення підзвітності алгоритмів прийняття рішень та дотримання етичних норм при використанні персональних даних. Вирішення цих питань вимагає розробки етичних framework-ів та регуляторних механізмів для Big Data систем.

Дефіцит кваліфікованих фахівців з аналізу даних характеризується невідповідністю між зростаючим попитом на експертів у сфері Big Data та обмеженою пропозицією на ринку праці. Ця ситуація зумовлена складністю галузі, що вимагає комбінації технічних, аналітичних та бізнес-навичок. Вирішення цієї проблеми потребує розробки спеціалізованих освітніх програм та стимулювання професійного розвитку в даній сфері.

Складність інтерпретації результатів аналізу полягає у труднощах перетворення масивних обсягів інформації на зрозумілі та дієві дані. Ця проблематика включає необхідність розробки ефективних методів візуалізації даних, створення інтуїтивно зрозумілих інтерфейсів та підвищення інтерпретації складних аналітичних моделей. Вирішення цієї проблеми є критичним для прийняття обґрунтованих рішень на основі аналізу Big Data.

Забезпечення кібербезпеки великих даних охоплює комплекс заходів щодо захисту інформаційних систем від несанкціонованого доступу, витоку даних та кібератак. Ця проблематика включає розробку та імплементацію передових технологій шифрування, аутентифікації та моніторингу для захисту масивних обсягів чутливої інформації.

Вирішення цієї проблеми є критичним для збереження цілісності та конфіденційності даних в екосистемі Big Data.

Проблема правового регулювання використання та обміну даними полягає у необхідності створення адекватної нормативно-правової бази, що відповідає специфіці технологій Big Data. Ця проблематика охоплює питання захисту персональних даних, інтелектуальної власності, транскордонної передачі інформації та відповідальності за неправомірне використання даних. Вирішення цієї проблеми вимагає гармонізації законодавства з технологічними реаліями та міжнародними стандартами.

Висновки. У контексті стрімкого розвитку інформаційних технологій, використання великих даних в інформаційних системах стикається з комплексом взаємопов'язаних проблем. Ці виклики охоплюють технічні, етичні, правові та соціальні аспекти, що вимагають системного підходу до їх вирішення. Ключовими проблемами є забезпечення якості та достовірності даних, масштабованість систем, захист конфіденційності, інтеграція гетерогенних джерел, забезпечення поточної обробки, етичні аспекти використання, нестача кваліфікованих фахівців,

складність інтерпретації результатів, кібербезпека та правове регулювання.

Вирішення цих проблем вимагає міждисциплінарного підходу, що поєднує інновації в галузі комп'ютерних наук, розробку нових алгоритмів аналізу даних, вдосконалення методів захисту інформації та створення адекватної нормативно-правової бази. Успішне подолання цих викликів є критичним для реалізації потенціалу великих даних у різних сферах людської діяльності, включаючи бізнес, науку, охорону здоров'я та державне управління. Це, у свою чергу, сприятиме подальшому розвитку інформаційного суспільства та цифрової економіки.

Важливо зазначити, що ці проблеми не є статичними, а еволюціонують разом із технологічним прогресом. Виникнення нових методів обробки даних, таких як штучний інтелект та машинне навчання, створює додаткові виклики та можливості. Отже, постійний моніторинг та адаптація стратегій управління великими даними є необхідними для забезпечення їх ефективного та етичного використання. Крім того, міжнародна співпраця та стандартизація підходів до роботи з великими даними стають все більш актуальними в контексті глобалізації інформаційних потоків.

Список літератури:

1. Дзямулич М. І., Шматковська Т. О., Борисюк О. В. Великі дані та їх роль у формуванні цифрової економіки. *Галицький економічний вісник*. 2021. №70(3). С. 16-21.
2. Конюш М. Р. Великі дані як загроза праву людини на недискримінацію. *Інформація і право*. 2021. №2 (37). С. 46-50.
3. Коротун Н. В. Сучасна модель інформаційного аналітика в умовах розвитку BigData в Україні. *Інформаційні технології і системи в документознавчій сфері*. 2024. С. 52-54.
4. Радутний О. Е. Великі Дані: поняття, ознаки та виклики (кримінально-правовий аспект). *Інформація і право*. 2023. №1 (44). С. 88-104.
5. Станкевич І. В., Сакун Г. О., Сакун О. В. Соціально-економічний феномен «великих даних» в стратегії цифрового маркетингу. *Вісник ХНТУ*. 2023. №2 (85). С. 235-239.
6. Усата О. Ю., Іванов Д. Є. Великі дані та основи роботи з ними. *Актуальні питання сучасної інформатики*. 2024. №11. С. 57-59.
7. Хаханова Г. Векторний метод пошуку послідовностей у великих даних. *Advanced Information Systems*. 2022. №6(3). С. 13-22.
8. Big data monetization throughout Big Data Value Chain: a comprehensive review / Faroukhi A. Z., El Alaoui I., Gahi Y., Amine A. *Journal of Big Data*. 2020. №7. P. 1-22.
9. Data-driven decision support under concept drift in streamed big data / Lu J., Liu A., Song Y., Zhang G. *Complex intelligent systems*. 2020. №6(1). P. 157-163.
10. McNeely C. L., Schintler L. A. Big data concept. *Encyclopedia of Big Data*. 2022. P. 79-82.
11. Towards a concept for building a big data architecture with microservices / Shakir A., Staegemann D., Volk M., Jamous N., Turowski K. *Business information systems*. 2021. P. 83-94.
12. Yang J. Big data and the future of urban ecology: From the concept to results. *Science China Earth Sciences*. 2020. №63(10). P. 1443-1456.

Regeda I.O., Reheda V.O. KEY ISSUES IN THE USE OF BIG DATA IN INFORMATION SYSTEMS AT THE CURRENT STAGE OF DEVELOPMENT

At the current stage of development, the role of Big Data is gaining paradigmatic importance, transforming approaches to information analysis and decision-making in various spheres of human activity. This technology,

characterized by the processing and analysis of massive volumes of structured and unstructured data, is becoming a key factor in innovative development and competitiveness.

In the business environment, Big Data enables a deeper understanding of consumer behavior, optimization of operational processes and forecasting of market trends. This leads to increased effectiveness of marketing strategies, improved customer experience and development of innovative products and services.

In the scientific field, big data opens up new horizons for research, allowing the analysis of complex systems and the discovery of hidden patterns. This is especially important in the fields of genomics, astronomy, climate science, and social sciences, where processing large amounts of data is critical to scientific progress.

In health care, Big Data contributes to the development of personalized medicine, early diagnosis of diseases and optimization of treatment processes. Analysis of large volumes of medical data allows to identify risk factors, predict epidemics and develop more effective treatment methods.

In the field of public administration, Big Data technologies increase the efficiency of public service provision, optimize decision-making processes and contribute to the development of "smart cities". This makes it possible to allocate resources more effectively and respond to the needs of citizens.

At the same time, the widespread use of Big Data gives rise to a number of ethical, legal and technical challenges, in particular regarding the protection of privacy, ensuring data security and overcoming the "digital divide". Solving these problems requires an integrated approach that combines technological innovation, development of an appropriate legal framework and ethical standards.

Thus, the role of Big Data at the current stage of development is to create new opportunities for innovation, increase the efficiency of processes in various areas and form the basis for making more informed decisions. It contributes to the overall progress of society by stimulating economic growth and improving the quality of life.

Key words: *Big Data, big data, analytics, data analysis, problems in the field of data analysis.*

Сікора О.В.

Дрогобицький державний педагогічний університет імені Івана Франка

Пазюк Р.І.

Дрогобицький державний педагогічний університет імені Івана Франка

ІГРОВІ ТЕХНОЛОГІЇ У ПІДВИЩЕННІ ЯКОСТІ НАВЧАННЯ ІНФОРМАТИКИ

В сучасному світі цифрові технології стали невід'ємною частиною освітнього процесу, відкриваючи нові можливості для вдосконалення методів навчання. Одним з перспективних напрямків є використання цифрових засобів ігрових технологій у вивченні інформатики, що дозволяє створити навчальне середовище, яке є більш динамічним та інтерактивним. Таке середовище сприяє не тільки засвоєнню теоретичних знань, але й розвитку практичних навичок. Воно дозволяє відчувати себе активними учасниками навчального процесу, а не просто пасивними споживачами інформації.

Одним з найпопулярніших цифрових засобів для реалізації ігрових технологій є ігрові середовища програмування. Вони дозволяють створювати власні ігри, анімації чи інтерактивні історії за допомогою візуальних блоків коду. Ця діяльність не лише розвиває навички програмування, але й заохочує творчість і дизайнерські здібності. Важливу роль у навчанні інформатики відіграють також віртуальні симулятори. Вони моделюють роботу комп'ютерних систем, мереж чи алгоритмів, надаючи можливість експериментувати та краще зрозуміти внутрішні процеси. Ігрові технології також можуть бути реалізовані через інтерактивні веб-сайти чи додатки, які пропонують навчальні ігри, вікторини чи головоломки.

Окрім розвитку технічних навичок, ігрові технології також сприяють формуванню «м'яких» навичок, таких як командна робота, комунікація, креативність та вирішення проблем. Учні можуть працювати в групах над створенням ігор чи симуляцій, розподіляючи ролі та відповідальність, що імітує реальне робоче середовище.

Цифрові засоби реалізації ігрових технологій при вивченні інформатики відкривають нові перспективи для залучення до активного навчального процесу. Вони дозволяють поєднати теорію з практикою, розвивати навички вирішення проблем, критичного мислення та креативності, а також створюють захоплююче та мотивуюче середовище для опанування інформаційних технологій.

Стаття присвячена важливості ігрових технологій у сучасній освіті та їх роль у підвищенні якості навчання інформатики. Досліджено цифрову компетентність сучасного вчителя та шляхи її формування. Особливу увагу приділено інтерактивним методам навчання з елементами гри, а також розглянуто рольові ігри як ефективні педагогічні інструменти. Проаналізовано використання ігрових технологій з застосуванням інформаційно-цифрових технологій (ІЦТ) для формування інформаційної компетентності учнів.

Ключові слова: інформаційно-цифрові технології, ігрові технології, інформаційні компетентності, інтерактивні методи навчання, педагогічні технології.

Постановка проблеми. Актуальність статті обумовлена швидким розвитком цифрових технологій та зростаючою потребою у вдосконаленні освітніх методик. Впровадження ігрових технологій з використанням інформаційно-комунікаційних технологій (ІКТ) для вивчення інформатики сприяє підвищенню мотивації учнів, полегшує засвоєння складних концепцій та краще розвиває практичні навички. Інтерактивні та ігрові методи навчання дозволяють створити більш динамічне та захоплююче навчальне середовище, що сприяє формуванню критичного мислення та

креативності. Завдяки інтерактивним інструментам, таким як мультимедійні презентації, віртуальні симуляції та ігрові навчальні середовища, учні активніше залучаються до процесу навчання. Відомо, що такі інтерактивні формати підвищують мотивацію та стимулюють навчальний ентузіазм, що є критично важливими факторами успішного навчання.

Впровадження інформаційних і цифрових технологій в освіту виступає як трансформаційна сила, що змінює навчальні парадигми з традиційних на інноваційні, де акцент робиться на підви-

щенні якості та доступності освіти для створення захоплюючого та інклюзивного навчального середовища.

Аналіз останніх досліджень і публікацій.

Чимало українських та зарубіжних науковців досліджують проблему формування цифрової компетентності вчителя та ефективного впровадження інформаційних технологій у навчальний процес. Зокрема, Л. Петухова акцентує на інформаційній компетентності, яка передбачає здатність особистості до реалізації знань та навичок у різних сферах діяльності, а також відповідальність за наслідки своїх дій [1]. О. Спірін розширює це поняття, включаючи використання інформаційних технологій для задоволення індивідуальних та суспільних потреб [2]. В. Биков та М. Лещенко вказують на роль сучасних інформаційних технологій у навчальній діяльності, яка відбувається на перетині реального та віртуального світів, та необхідність адаптації класичних методів педагогіки до цифрової ери [3]. Дж. Крумсвік підкреслює важливість цифрової компетентності для педагогів, яка включає не лише технічні навички роботи з ІКТ, але й критичне оцінювання ресурсів, планування та керування освітнім процесом з їх використанням [4].

Концепція Нової української школи включає інформаційно-цифрову компетентність до списку базових компетенцій учителя, підкреслюючи важливість вміння орієнтуватися в інформаційному просторі та критично застосовувати ІКТ у професійній діяльності [5].

Постановка завдання. Використання цифрових засобів реалізації ігрових технологій при вивченні інформатики та демонстрація їх практичного застосування.

Виклад основного матеріалу. Одним з головних завдань інформаційно-цифрових технологій (ІЦТ) в освіті є підвищення доступності навчальних матеріалів. Завдяки цифровим технологіям доступ до освітніх ресурсів можна отримати в будь-який час і з будь-якого місця, долаючи географічні та часові бар'єри, які традиційно перешкоджали доступу до якісної освіти. Гнучкість, яка з'являється в результаті використання ІЦТ в навчальному процесі, дозволяє враховувати різноманітні стилі і темпи навчання та підлаштовувати навчальний процес під індивідуальні потреби. Вона має першочергове значення в глобалізованому освітньому контексті, де навчання має бути безперервним і швидко адаптуватися до змін.

Різні наукові підходи до інтеграції цифрових технологій в освіту підкреслюють важливість

стратегічного та продуманого впровадження. У той час як деякі науковці наголошують на технічних аспектах, таких як інфраструктура та інструменти, необхідні для інтеграції ІЦТ, інші зосереджуються на педагогічних змінах, необхідних для максимального розкриття потенціалу цих технологій. Критичний аналіз цих точок зору виявляє консенсус щодо необхідності узгодження технологічних інструментів з педагогічними цілями для досягнення оптимальних освітніх результатів.

Цифрові інструменти та ресурси надають вчителям змогу інноваційно підходити до методів навчання. Наприклад, використання аналітики даних та систем управління навчанням може допомогти освітянам відслідковувати прогрес учнів у реальному часі, виявляти прогалини в знаннях і відповідно коригувати інструкції. Цей механізм зворотного зв'язку в реальному часі підвищує реактивність освітньої системи, роблячи її більш адаптивною до змін у освітньому середовищі.

Інтеграція ІЦТ також сприяє співпраці серед учнів за допомогою платформ, які підтримують групові проекти та взаємодію один з одним. Це не тільки допомагає розвивати необхідні соціальні та комунікативні навички, але й готує учнів до реалій сучасного діджиталізованого світу, в якому все більше цінується вміння ефективно співпрацювати через цифрові платформи.

Крім того, розвиток цифрової грамотності є ще одним значним результатом інтеграції технологій у освіту. Оскільки учні використовують різні цифрові інструменти та платформи, вони здобувають критичні цифрові навички, які є невід'ємними в сучасному технологічно насиченому світі. Це не тільки покращує їхні академічні досягнення, але й забезпечує необхідними компетентностями для успіху в цифровій економіці.

Проте, успішна інтеграція інформаційних та цифрових технологій у освіту вимагає більшого, ніж просто надання необхідних інструментів та технологій. Вона вимагає всебічного підходу, який включає розробку навчальних програм, підготовку вчителів та оновлення політик, щоб забезпечити повне використання потенціалу цифрових інновацій. Вчителі повинні бути належно підготовлені до ефективного використання цих технологій, а навчальні програми потрібно регулярно оновлювати, включаючи цифрові компетентності як основні компоненти освітньої системи.

У цифрову епоху формування інформаційно-цифрової компетентності є критично важливим для всіх учасників освітнього процесу, включа-

ючи учнів, педагогів, персонал, що забезпечує функціонування ІКТ, державних органів та освітніх інституцій. Ця компетентність передбачає впевнене та критичне використання технологій інформаційного суспільства для роботи, дозвілля, навчання та спілкування. Вона лежить в основі здатності адаптуватися до вимог цифрового середовища, що розвивається, та формувати їх.

Навчальні заклади відіграють ключову роль у розвитку цих компетентностей. Цей процес вимагає стратегічного підходу, який включає розробку і впровадження комплексних цифрових навчальних програм, інвестиції в ІКТ-інфраструктуру та професійний розвиток педагогів. Створення цифрової культури в школах може захопити всіх учасників розвивати необхідні навички та ставлення до цифрової компетентності.

Освітняни перебувають на передньому краї процесу формування цифрової компетентності в учнів. Безперервний професійний розвиток має вирішальне значення, дозволяючи вчителям бути в курсі технологічного прогресу та педагогічних стратегій. Семінари, онлайн-курси та сертифікаційні програми є ефективними способами покращити цифрові навички вчителів.

Підходи, орієнтовані на учня, які включають активні стратегії навчання, такі як навчання на основі проєктів та проблемне навчання, надають практичний досвід використання цифрових інструментів. Виконуючи реальні завдання, учні можуть розвивати цифрову грамотність поряд з іншими ключовими навичками 21 століття, такими як критичне мислення та співпраця.

Використання ігрових технологій та платформ електронного навчання може забезпечити інтерактивний та персоналізований досвід навчання. Ці платформи часто включають цілий ряд ресурсів, таких як відеоуроки, інтерактивні симуляції та вікторини, які задовольняють різноманітні навчальні уподобання. Крім того, вони дають можливість учням навчатися у власному темпі.

Формування цифрової компетентності також передбачає розуміння етичних, культурних і соціальних питань, пов'язаних з використанням ІКТ. Школи повинні навчати учасників таких тем, як цифрове громадянство, безпека в Інтернеті та конфіденційності даних. Створення чітких політик і рекомендацій щодо використання технологій – це крок до формування відповідальної цифрової спільноти в освітньому середовищі.

Щоб переконатися, що формування цифрової компетентності йде в правильному напрямку, необхідна чітка і прозора система оцінювання, що

включає модульне і підсумкове оцінювання, яке вимірює не лише технічні навички, а й здатність критично та відповідально використовувати технології.

Цифрові портфоліо стали інноваційним способом документування та демонстрації прогресу в розвитку цифрових навичок учнів і педагогів. Ці портфоліо можуть містити різноманітні докази, такі як завершені проєкти, роздуми про навчальний досвід та отримані сертифікати. Вони дають цілісне уявлення про здібності людини та її розвиток з плином часу.

Постійний зворотній зв'язок має вирішальне значення для розвитку цифрових компетентностей. Такі інструменти, як платформи експертного оцінювання та цифрові форми зворотного зв'язку, можуть сприяти постійному вдосконаленню процесу навчання та адаптації навчальних матеріалів. Використання цих інструментів дозволяє педагогам швидко реагувати на потреби студентів, модифікувати методи викладання та оптимізувати навчальний контент відповідно до отриманої інформації. Також, систематичний зворотній зв'язок допомагає учням усвідомлювати власні успіхи та області, які потребують додаткової уваги

Розуміючи всю важливість формування інформаційно-цифрової компетентності суспільства Міністерство цифрової трансформації України розробило проєкт Рамки цифрової компетентності для громадян – документ, метою якого є підвищення рівня цифрових навичок українців. За основу була взята модель цифрових компетентностей для громадян ЄС (DigComp 2.2: The Digital Competence Framework for Citizens), яку експерти адаптували до українських реалій. Рамка включає 5 вимірів, 6 сфер, 30 компетентностей та 6 рівнів оволодіння кожною компетентністю [6].

В подальшому дана Рамка послужила фундаментом для розробки ще декількох подібних галузевих документів, серед яких «Рамка цифрової компетентності педагогічних й науково-педагогічних працівників». Цей ґрунтовний документ по суті є концепцію цифрової майстерності для освітян, відкриває нові горизонти у формуванні стандартів навчання, розробці курсів для освітніх інституцій, а також у підготовці та професійному розвитку вчителів. Рамку можна сміливо вважати ключем до самовдосконалення для освітян. Згідно даного документу педагогічні працівники повинні:

– глибоко розуміти цифрову трансформацію у суспільстві, орієнтуватися у цифровій економіці, освітньому середовищі та ресурсах, кібербезпеці, а також у методах цифрового оцінювання;

| Сфери | Компоненти цифрової компетентності |
|--|--|
| Основи комп'ютерної грамотності | <ul style="list-style-type: none"> • Використання комп'ютерних та мобільних пристроїв • Використання системного програмного забезпечення • Використання застосунків та прикладного програмного забезпечення • Використання інтернету та онлайн застосунків • Управління цифровою ідентичністю |
| Інформаційна грамотність, уміння працювати з даними | <ul style="list-style-type: none"> • Перегляд, пошук і фільтрація даних, інформації та цифрового контенту • Інформаційна грамотність, критичне оцінювання даних, інформації та цифрового контенту • Управління даними, інформацією та цифровим контентом • Реалізація власних запитів та потреб за допомогою цифрових технологій • Самореалізація та особистий розвиток у цифровому суспільстві |
| Створення цифрового контенту | <ul style="list-style-type: none"> • Створення цифрового контенту • Редагування та інтеграція цифрового контенту • Авторське право і ліцензії • Первинні навички програмування • Творче використання цифрових технологій |
| Комунікація та взаємодія у цифровому суспільстві | <ul style="list-style-type: none"> • Комунікація за допомогою цифрових технологій • Поширення та обмін даними за допомогою цифрових технологій • Співпраця за допомогою цифрових технологій • Цифрове громадянство. Використання е-послуг • Відповідальність правові та етичні норми. Мережевий етикет |
| Безпека в цифровому середовищі | <ul style="list-style-type: none"> • Захист пристроїв та безпечне підключення до мережі інтернет • Захист персональних даних та приватності. Безпека в інтернеті • Захист особистих прав споживача від шахрайства та зловживань • Захист здоров'я і благополуччя • Захист навколишнього середовища |
| Розв'язання проблем у цифровому середовищі та навчання | <ul style="list-style-type: none"> • Розв'язання технічних проблем • Визначення потреб та їх технологічне вирішення • Самооцінювання рівня власної цифрової компетентності виявлення та усунення прогалин • Вирішення життєвих проблем за допомогою цифрових технологій • Навчання впродовж життя. Та професійний розвиток у цифровому середовищі |

Рис. 1. Рамка цифрової компетентності громадян України

– знати, як цифрові технології сприяють професійній комунікації, співпраці та інноваціям;

– усвідомлювати функціональні можливості та ризики, пов'язані з використанням цифрових технологій;

– розуміти принципи та механізми, на яких базуються цифрові сервіси, вміти використовувати різні цифрові пристрої та програми;

– критично оцінювати інформаційні джерела, розуміти вплив інформації на особистість і прийняття рішень, а також враховувати юридичні та етичні аспекти використання цифрових технологій;

– ефективно використовувати, оцінювати, створювати та поширювати цифрові освітні ресурси, забезпечувати захист даних та цифрових ідентич-

ностей, а також вміло обробляти цифрові засоби та технології.

Ігрові технології ґрунтуються на принципах гейміфікації – застосуванні ігрових механік та ігрових елементів (таких як бали, рівні, нагороди, змагання) у неігровому контексті для заохочення певної поведінки та досягнення навчальних цілей.

До основних ігрових технологій навчання належать:

– рольові ігри: учні виконують певні ролі, моделюючи реальні або уявні ситуації. Це сприяє розвитку навичок критичного мислення, вирішення проблем, емпатії;

– квести та головоломки; учні мають розгадувати загадки, виконувати завдання та долати

перешкоди, щоб просуватися від одного рівня до іншого;

– симуляції та віртуальні світи: імітація реальних процесів та систем у безпечному ігровому середовищі, де учні можуть експериментувати та вчитися на власному досвіді;

– відеоігри з освітнім контентом: ігри, які поєднують розважальний контент із навчальними елементами та завданнями;

– гейміфікація навчальних завдань: інтеграція ігрових елементів у традиційні освітні заходи, такі як вікторини, квізи, завдання тощо.

Перш ніж впроваджувати елементи гри, важливо визначити чіткі навчальні цілі та правила. Вчителі повинні переконатися, що ігрові елементи відповідають навчальним цілям і що учні розуміють, як ці види діяльності вписуються в загальну навчальну програму. Таке узгодження допомагає учням побачити зв'язок гри з їхнім навчанням і мотивує їх до активної участі. Педагоги повинні обережно інтегрувати ігрові елементи в навчальну програму, не перевантажуючи навчальний зміст. Ігри повинні слугувати інструментом для покращення розуміння, а не відволікати від освітніх цілей.

Здавалося б, що організація ігрової форми навчання на уроці інформатики завдання не з складних, адже комп'ютер сам по собі надає невичерпні можливості використання ігрових технологій. Проте, цей процес вимагає ретельного планування, впровадження та рефлексії. Дотримуючись структурованого підходу та використовуючи найкращі практики, вчитель може створити цікавий та ефективний навчальний досвід.

Організація ігрової форми навчання починається з планування і підготовки і включає наступні кроки:

– визначення навчальних цілей, яких педагог бажає досягти під час уроку;

– вибір ігрового підходу, який відповідає навчальним цілям і залучає учнів до активного навчання;

– вибір цифрових технологій (апаратних та програмних засобів, додатків, сервісів та навчальних платформ);

– розробка серії навчальних вправ, які включають обраний ігровий підхід та цифрові технології;

– підготовка матеріалів та ресурсів;

– розробка стратегії для підтримання позитивного та продуктивного навчального середовища, включно з чіткими інструкціями та рекомендаціями.

Висновки. У статті проаналізовано роль інформаційно-цифрових технологій у забезпеченні якості освіти. Визначено, що інтеграція інформаційно-цифрових технологій дозволяє підвищити доступність, гнучкість та ефективність навчання, що сприяє кращому задоволенню потреб учнів. Встановлено, що використання цифрових інструментів та ресурсів сприяє активнішій залученості учнів до навчального процесу, підвищенню їхньої мотивації та результативності. Досліджено цифрову компетентність сучасного вчителя та проаналізовано наукові підходи до формування цієї компетентності, зокрема, через розвиток цифрової грамотності та інтеграцію ІКТ у педагогічну практику. Визначено, що ефективне впровадження ігрової форми навчання потребує всебічного підходу, включаючи навчальні програми, підготовку вчителів та оновлення політик. Визначено шляхи інтеграції ігрових елементів в навчальну програму для заохочення певної поведінки та досягнення навчальних цілей.

Виявлено, що використання ігрових технологій вимагає розуміння етичних, культурних та соціальних аспектів використання ІКТ, а також застосування ефективної системи оцінювання та постійного зворотного зв'язку.

Список літератури:

1. Петухова, Л.Є. Теоретико-методичні засади формування інформатичних компетентностей майбутніх учителів початкових класів : автореф. дис. д-ра пед. наук : 13.00.04 Л.Є. Петухова; Південноукр. держ. пед. ун-т ім. К. Д. Ушинського. Одеса, 2009. 41 с.
2. Спірін О.М. Інформаційно-комунікаційні та інформатичні компетентності як компоненти системи професійно-спеціалізованих компетентностей вчителя інформатики. / *Інформаційні технології і засоби навчання*. 2009. №5 (13).
3. Биков В., Лещенко М. Цифрова гуманістична педагогіка відкритої освіти / *Теорія і практика управління соціальними системами*. 2016. № 4. С. 115-130.
4. Krumsvik, R. Situated learning and digital competence R. Krumsvik *Education and Information Technology*. 2008. v.13. p. 279-290.
5. Концепція нової української школи [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://mon.gov.ua/storage/app/media/zagalna%20serednya/nova-ukrainska-shkola-compressed.pdf>
6. Рамка цифрової компетентності громадян України [Електронний ресурс]. Режим доступу: https://osvita.dii.gov.ua/uploads/1/6287-proekt_ramki_cifrovoi_kompetentnosti_gromadan_ukraini_digcompua_2_2.pdf

Sikora O.V., Pazyuk R.I. GAME TECHNOLOGIES IN INCREASED QUALITY EDUCATION OF COMPUTER SCIENCES

In today's world, digital technologies have become an integral part of the educational process, opening up new opportunities for improving teaching methods. One of the promising directions is the use of digital means of game technologies in the study of informatics, which allows creating an educational environment that is more dynamic and interactive. Such an environment contributes not only to the assimilation of theoretical knowledge, but also to the development of practical skills. It allows you to feel like an active participant in the educational process, and not just a passive consumer of information.

One of the most popular digital tools for the implementation of game technologies are game programming environments. They allow you to create your own games, animations or interactive stories using visual blocks of code. This activity not only develops programming skills, but also encourages creativity and design skills. Virtual simulators also play an important role in computer science education. They simulate the operation of computer systems, networks or algorithms, providing an opportunity to experiment and better understand internal processes. Game technologies can also be implemented through interactive websites or applications that offer educational games, quizzes or puzzles.

In addition to the development of technical skills, game technologies also contribute to the formation of "soft" skills such as teamwork, communication, creativity and problem solving. Students can work in groups to create games or simulations, assigning roles and responsibilities that simulate a real work environment.

Digital means of implementing game technologies in the study of informatics open up new perspectives for involvement in the active educational process. They allow you to combine theory with practice, develop problem-solving skills, critical thinking and creativity, and create an exciting and motivating environment for mastering information technologies.

The article is devoted to the importance of information and digital technologies in modern education and their role in improving the quality of computer science education. The digital competence of the modern teacher and the ways of its formation were studied. Special attention is paid to interactive learning methods with game elements, and business and role-playing games are considered as effective pedagogical tools. The use of game technologies with the use of information and digital technologies for the formation of students' information competence is analyzed.

In the practical part of the article, methodological recommendations for teachers regarding the implementation of game technologies in the teaching of informatics are developed, as well as examples of games that can be used to increase interest and learning efficiency are considered.

Key words: *information and digital technologies, game technologies, information competences, interactive learning methods, pedagogical technologies.*

Соломчак О.В.

Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу

Соломчак А.О.

Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу

ВИМІРЮВАННЯ ВИЩИХ ГАРМОНІК СТРУМІВ І НАПРУГ В ТОЧКАХ СПІЛЬНОГО ПРИЄДНАННЯ РОЗПОДІЛЬНИХ ЕЛЕКТРИЧНИХ МЕРЕЖ

Зростання енергоємності комунально-побутових споживачів та ущільнення забудови населених пунктів призвело до збільшення навантаження на трансформатори та їх роботу на межі номінальної потужності. Це викликає насичення магнітопроводу та обрізання вершків синусоїди напруги. Одночасно зростає кількість та потужність нелінійних електроприймачів, що спричиняє появу вищих гармонік струмів і напруг в електричних мережах. Аналіз останніх досліджень показує, що проблема несинусоїдальності напруг і струмів залишається актуальною. Математичне моделювання не дає достовірних рішень для групових навантажень трансформаторних підстанцій. Метою роботи є вимірювання та аналіз несинусоїдальності струмів і напруг навантажень трансформаторних підстанцій, дослідження гармонічного складу групових навантажень та їх відповідність міжнародним стандартам. Проведено ряд вимірювань несинусоїдальності струмів і напруг навантажень трансформаторних підстанцій населених пунктів. Досліджено гармонічний склад групових навантажень та їх відповідність міжнародним стандартам. Коефіцієнт спотворення синусоїдальної кривої напруг THD на шини 0,4 кВ трансформаторної підстанції був в межах норми. За результатами тижневого моніторингу, перевищення граничних значень TDD струму фіксувалися більше 30% часу моніторингу, що не відповідає стандарту IEEE 519-2014. Для моніторингу рівнів вищих гармонік в точках спільного приєднання рекомендовано використовувати сучасні прилади, які дозволяють контролювати THD напруг і TDD струмів з використанням практичних рекомендацій стандартів IEEE 519-2014 та IEEE 1159-2019. Запропоновано заходи з обмеження рівнів вищих гармонік на підстанціях населених пунктів.

Ключові слова: гармонічні спотворення, нелінійні навантаження, вимірювання гармонік, моніторинг, якість електроенергії, точка спільного приєднання, спотворення загального споживання, коефіцієнт гармонічних спотворень, міська підстанція.

Постановка проблеми. Зростання енергоємності комунально-побутових споживачів, ущільнення забудови міст і сіл спричинило зростання навантаження силових трансформаторів у населених пунктах і їх роботу на межі номінальної потужності. Це спричиняє насичення магнітопроводу і обрізання вершків синусоїди напруги. Одночасно збільшилася кількість і потужність нелінійних електроприймачів в побутовому секторі, що спричинило появу вищих гармонік струмів і напруг в електричних мережах населених пунктів.

Несинусоїдальність характеризується коефіцієнтом і-ої гармонійної складової та коефіцієнтом спотворення синусоїдальності кривої. Гармоніки виникають у мережах як наслідок роботи нелінійних навантажень, імпульсних джерел живлення, газорозрядних та світлодіодних ламп, мікрохвильових печей, напівпровідникових регуляторів

обертів електродвигунів, інверторних електроприводів, побутових сонячних електростанцій, тощо.

Відомо, що несинусоїдальність струмів і напруг призводить до таких негативних наслідків як додаткові втрати електроенергії, надмірне навантаження елементів електричної мережі, зменшення пропускної здатності, нагрів електричних машин і апаратів, збільшення активного опору провідника через поверхневий ефект, збільшення втрат в діелектрику ізоляції кабелю, хибні спрацювання пристроїв захисту, резонансні явища, наведення в телекомунікаційних і керуючих мережах, підвищення акустичних шумів в електромагнітному обладнанні. Гармоніки можуть спричинити некоректну роботу автоматизованих систем комерційного обліку електроенергії (АСКОЕ) побутових електроприймачів, які в якості каналів зв'язку використовують електричні мережі 0,4 кВ.

Аналіз останніх досліджень і публікацій.

Питання несинусоїдальності є достатньо дослідженими в промисловому секторі. У монографії [1] розглянуті загальні підходи до проблеми якості електричної енергії в тягових мережах, проблематика та нормативно-правове регулювання у сфері якості електричної енергії, результати експериментальних досліджень якості електричної енергії у системах тягового електропостачання постійного та змінного струму, питання обліку електричної енергії при несинусоїдних режимах роботи тягових підстанцій, а також методи і засоби поліпшення якості електричної енергії. Поява вищих гармонік потребує уточнення методів і алгоритмів вимірювання реактивної потужності [2]. В статті проведено аналіз можливостей вимірювання реактивної потужності в асиметричних несинусоїдних режимах трифазних мереж із заземленою нейтраллю за допомогою класичних і миттєвих потужностей. Показано, що при незначній асиметрії режиму можна застосувати будь-яку потужність. Запропоновано для визначення потужності гармонічних спотворень використовувати середньоквадратичні значення різниці потужностей пульсацій та небалансу. Показано, що потужність спотворення, зумовлену наявністю канонічних гармонік, достатньо вимірювати на частоті шостої гармоніки напруги живлення. Запропоновано формули для визначення цієї потужності з використанням миттєвих потужностей. В роботі [3] акцентовано увагу на появі нелінійних електронних навантажень, включаючи розподілені генерації та електромобілі. Автори намагаються оцінити гармонічні спотворення в системах розподілу, викликані різними нелінійними житловими навантаженнями. Експериментально отримані гармонічні спектри декількох побутових приладів, використані для моделювання типової системи розподілу Великобританії за допомогою програми «Електричний аналізатор перехідних процесів» (ETAP). Результати показують високий рівень гармонічних спотворень в точці загального приєднання, в системі розподілу, яка ще більше посилюється при розгляді більш високого рівня навантаження розподільного трансформатора. В [4] досліджено вплив міського залізничного транспорту на електромережі. Спотворення форми синусоїди в системі електроживлення метрополітену спричинено випрямлячем та інвертором блоку живлення постійного струму та інших електронних пристроїв в системі електропостачання тягового транспорту. Ця робота в основному вивчає гармо-

нічні проблеми, спричинені системою електропостачання тягового електротранспорту на основі моделювання за допомогою MATLAB. В [5] теоретично досліджено кумулятивні властивості гармонічного струму великої кількості нелінійних однофазних силових електронних навантажень. Виведена повна аналітична модель для найбільш поширеного типу навантаження. Потім ця модель використовується для дослідження впливу і взаємодії через імпеданс спільного джерела, зміни рівня потужності та зміни параметрів кіл на індивідуальні та кумулятивні струмові гармоніки. Показано неприпустимість арифметичного сумування величин вищих гармонік. Стаття [6] присвячена дослідження вищих гармонік, спричинених побутовими електроприладами. Звернено увагу на недостатнє приділення уваги даному питанню. Ця стаття досліджує необхідність врахування гармонічних спотворень на етапі проектування інженерних проектів електропостачання. Отримані результати свідчать про те, що гармоніки в розподільній мережі можуть накопичуватись, спричиняючи накопичувальний ефект у мережі. Крім того встановлено, що в розподільній мережі, яка містить побутові сонячні фотовольтаїчні системи, може бути зменшена проблема гармонічного впливу. В роботі [7] проведено комп'ютерне моделювання в середовищі DIgSILENT PowerFactory впливу тягових випрямлячів рейкового електротранспорту на спотворення форми струмів і напруг. Показано, що результати математичного моделювання не завжди співпадають з результатами експериментальних вимірів через складність врахування всіх навантажень, а також несинусоїдальність живлячої напруги. В результаті, значення гармонік струму, характерних для випрямляча може змінюватися. Крім того, можуть з'являтися інші гармоніки, які не характерні при синусоїдній нарузі. Дослідженням гармонічних рівнів у різних точках ліній електропередач [8] встановлено, що потужні низьковольтні споживачі створюють рівні гармонік струму, які перевищують порогові межі, визначені стандартом IEEE 519-2014 [9]. Причиною цього є те, що споживачі низької напруги генерують гармоніки безпосередньо в лінії електропередачі, на відміну від споживачів середньої і високої напруги, де більшість гармонік фільтруються на знижувальних трансформаторах споживачів.

Енергосистема повинна визначати допустимі рівні гармонік для потужних низьковольтних електроприймачів, щоб зменшити шкідливий вплив високих рівнів гармонік на розподільчу мережу.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Як видно з аналізу останніх досліджень і публікацій проблема несинусоїдальності напруг і струмів в електричних мережах населених пунктів стоїть досить гостро, рівень вищих гармонік наростає. Недостатньо дослідженими залишаються групові навантаження трансформаторних підстанцій населених пунктів. Результати математичного моделювання не дають достовірних рішень.

Постановка завдання. Метою роботи є експериментальні дослідження несинусоїдальності струмів і напруг навантажень трансформаторних підстанцій населених пунктів в Україні, дослідження гармонічного складу групових навантажень в точках спільного приєднання та їх відповідність міжнародним стандартам.

Виклад основного матеріалу. У 2014 році в стандарт IEEE 519 [9] було внесено ряд уточнень порівняно з редакцією 1992 року. Так уточнено поняття точки спільного приєднання (point of common coupling – PCC). Це межа між власником енергосистеми або оператором і користувачем, де PCC зазвичай приймається як точка в енергосистемі, найближча до користувача, де власник системи або оператор можуть запропонувати приєднання іншому користувачеві. Часто для промислових користувачів (тобто виробничих установок), які отримують живлення через абонентський трансформатор, PCC знаходиться на стороні високої напруги трансформатора. Для комерційних користувачів (офіси, торгові центри тощо), що отримують живлення через загальний трансформатор, PCC зазвичай знаходиться на стороні низької напруги трансформатора. В редакції 2014 року [9] чітко визначена спільна відповідальність за контроль гармонік між власниками системи або операторами та користувачами: усі користувачі обмежують свої гармонічні спотворення струмів до розумних значень, визначених справедливим чином, виходячи з частки власності кожного користувача у системі постачання та кожен власник системи або оператор вживає заходів для зниження рівня спотворень синусоїдальності напруги, за необхідності змінюючи характеристики імпедансу системи живлення. Контролюються гармоніки до 50-ї включно. Для моніторингу рівнів гармонік визначено одно і семиденні періоди. Для точок приєднання напругою до 1 кВ збільшено значення граничних показників. Так допустиме значення коефіцієнта гармонічних спотворень (THD) напруги (коефіцієнт спотворення синусоїдальності кривої напруги) збільшено до 8%, а рівень окремих гармонік до 5%. Ці значення повинні бути забезпечені протягом 99% часу доби і 95% часу 7 днів.

Щодо гармонік струмів встановлено 3 межі процентиль:

– протягом тижня 95 процентиль 10 хвилинних вимірювань гармонічних струмів повинні бути менше значень, наведених в табл. 1.

– протягом тижня 99 процентиль 10 хвилинних вимірювань гармонічних струмів не повинні перевищувати 1.5 кратних значень, наведених в табл. 1.

– щоденно 99 процентиль короточасних вимірювань (3 сек) гармонічних струмів не повинні перевищувати 2,0 кратних значень, наведених в табл. 1.

Всі значення повинні бути в процентах від максимального струму споживання I_L , який визначається в PCC, як середнє значення струмів максимального споживання за 12 попередніх місяців.

Таблиця 1

Граничні значення спотворень струмів для мереж напругою від 120 В до 69 кВ

| Максимальне гармонійне спотворення струму у відсотках від I_L | | | | | | |
|--|-----------------|------------------|------------------|------------------|---------------------|------|
| Значення індивідуальних гармонік (непарні гармоніки) ^{a, b} | | | | | | |
| I_{sc}/I_L | $3 \leq h < 11$ | $11 \leq h < 17$ | $17 \leq h < 23$ | $23 \leq h < 35$ | $35 \leq h \leq 50$ | TDD |
| < 20 ^c | 4.0 | 2.0 | 1.5 | 0.6 | 0.3 | 5.0 |
| 20 < 50 | 7.0 | 3.5 | 2.5 | 1.0 | 0.5 | 8.0 |
| 50 < 100 | 10.0 | 4.5 | 4.0 | 1.5 | 0.7 | 12.0 |
| 100 < 1000 | 12.0 | 5.5 | 5.0 | 2.0 | 1.0 | 15.0 |
| > 1000 | 15.0 | 7.0 | 6.0 | 2.5 | 1.4 | 20.0 |

^a Парні гармоніки обмежені 25% від верхньої межі непарних гармонік.

^b Спотворення струму, які призводять до зміння постійного струму не допускаються.

^c Усе обладнання для виробництва електроенергії обмежено цими значеннями спотворення струму, незалежно від фактичного I_{sc}/I_L .

I_{sc} = максимальний струм короткого замикання в точці PCC
 I_L = максимальний струм навантаження (основна гармоніка) в точці PCC за нормальних робочих умов навантаження

Для струму контролюється не THD, а показник спотворення загального споживання (TDD) – це пофазне гармонічне спотворення струму відносно максимального споживання в точці PCC.

TDD характеризує вплив гармонічних спотворень на систему. Наприклад, якщо в мережі високі значення THD, але низьке споживання, вплив гармонічних спотворень на вашу мережу може бути незначним. Однак при максимальному навантаженні і значенні THD рівному TDD, вплив на мережу буде значним. TDD оцінює співвідношення гармонічних струмів між кінцевим споживачем та джерелом живлення.

Авторами статті зроблено свій вклад в дослідження несинусоїдальності побутових елек-

троприймачів [10-12]. Експериментально досліджено рівні вищих гармонік струму та коефіцієнт несинусоїдальності типових побутових електроприймачів: газорозрядних та світлодіодних ламп, мікрохвильової печі, електронної апаратури з імпульсними блоками живлення, електроприладів з колекторними двигунами, обладнаними тиристорними регуляторами, побутових сонячних електростанцій та ін. У багатьох з них рівень вищих гармонік струму перевищує допустимі значення, що спричинено відсутністю в цих приладах фільтрів вищих гармонік і використанню дешевих блоків живлення. При чому на багатьох електронних платах передбачено місця для елементів фільтру, але фактично деталі відсутні.

Враховуючи те, що алгебраїчно сумувати амплітуди вищих гармонік струму є неправильно через різний зсув фаз, рівні вищих гармонік групового навантаження можна встановити тільки експериментальним шляхом.

Для дослідження було вибрано декілька типових міських трансформаторних підстанцій 10/0,4 кВ. Основними електроприймачами на яких є комунально-побутові та офісно-адміністративні споживачі. Моніторинг проводився протягом тижня. Вимірювання здійснювались як на окремих магістральних кабелях (фідерах), так і на вводі низької напруги силового трансформатора ТМ-630/10. Співвідношення струму короткого замикання до максимального струму споживання в РСС становить $I_{SC}/I_L=12$. На жаль, через відсутність трансформаторів струму зі сторони 10 кВ силового трансформатора, не вдалось дослідити рівень гармонік струмів і напруг на 10 кВ. Наявні прилади не дозволяли проводити виміри безпосередньо на напрузі 10 кВ.

Моніторинг спектрального складу струмів і напруг протягом доби проводився за допомогою приладу Ресурс-UF2М (рис. 1), який має чотири вимірювальних входи напруги і чотири групи для вимірювання характеристик струмів. Абсолютна похибка при вимірюванні коефіцієнта спотворення синусоїдальності кривої струму і напруги THD становить $\pm(0,05+0,02 \cdot \text{THD}_{\%})$, а коефіцієнта гармонічних складових $\pm(0,03+0,02 \cdot K_{(n),\%})$.

Вимірювання здійснювались щохвилинно протягом 7 діб підряд. 10-ти хвилинні значення розраховувались як середньоквадратична величина вимірювань протягом цього інтервалу.

Форми струмів і напруг для одного з періодів часу показано на рис. 2 і 3.



Рис. 1. Прилад Ресурс-UF2М для моніторингу показників якості електроенергії



Рис. 2. Фазні напруги

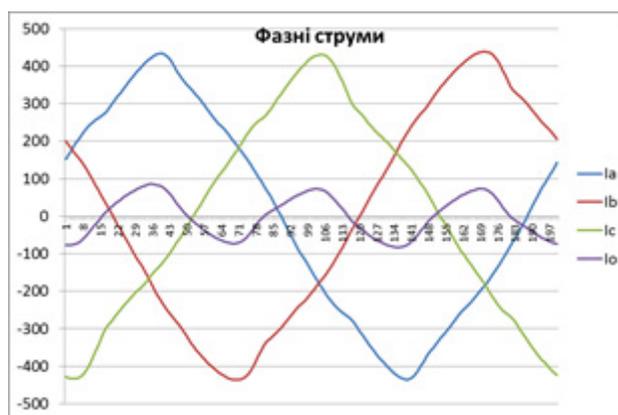


Рис. 3. Фазні струми

На рис. 4 і 5 наведено графіки зміни коефіцієнтів спотворення синусоїдності THD фазних напруг протягом доби та коефіцієнти гармонічних складових фазної напруги фази А (фази В і С практично аналогічні) – середнє та найбільші короточасні значення.

Як бачимо, на шинах 0,4 кВ ТП – в точці спільного приєднання рівень нелінійних спотворень напруг не перевищував допустимі 8%, а рівень окремих гармонік не перевищив 5%.

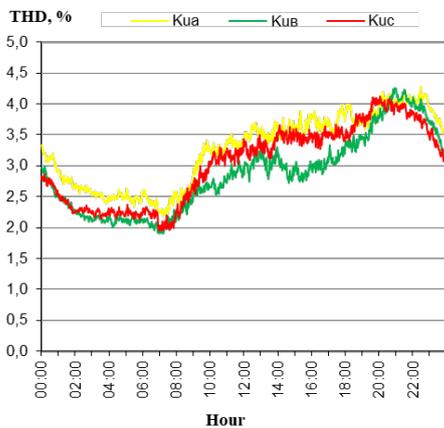


Рис. 4. Добові графіки коефіцієнтів спотворення синусоїдальності фазних напруг THD (%)

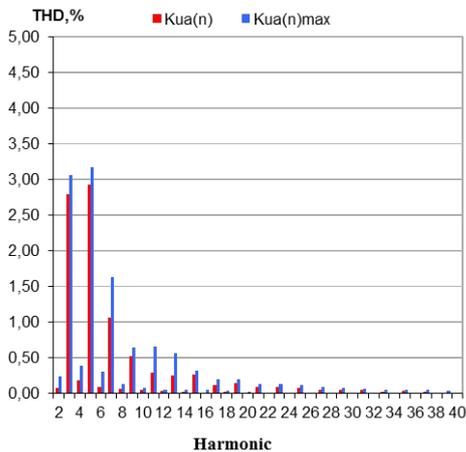


Рис. 5. Коефіцієнти n-их гармонічних складових напруги Ua

Оскільки прилад Ресурс-UF2М вимірює тільки показник THD струмів, значення TDD довелося визначати розрахунковим шляхом за виразом

$$TDD = THD \frac{I_1}{I_L},$$

де I_1 – значення струму першої гармоніки, А; I_L – максимальний струм споживання в точці РСС, А.

На рис. 6 наведено графіки спотворення загального споживання TDD фазних струмів, а на рис. 7, для порівняння, коефіцієнти спотворення синусоїдальності фазних струмів THD. Як видно вони суттєво різняться.

Згідно [9] протягом доби значення TDD струму не повинно перевищувати двократних значень (10%), наведених в табл. 1 протягом 99% часу. Як видно з рис. 6 граничну межу перевищено у фазі В протягом 4.4% часу доби і незначно у фазі С – 0,1%.

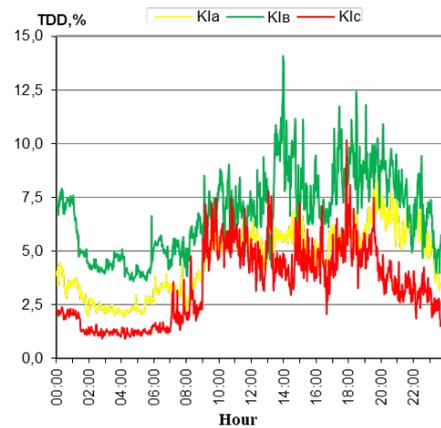


Рис. 6. Добові графіки коефіцієнтів спотворення загального споживання струмів TDD (%)

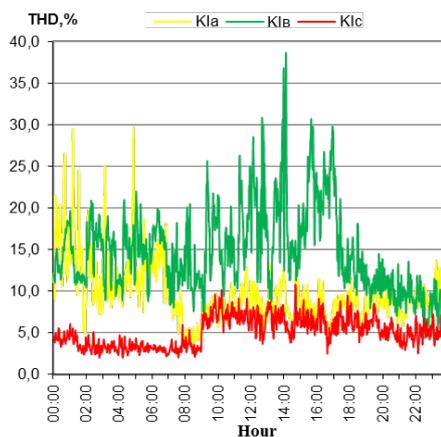


Рис. 7. Добові графіки коефіцієнтів спотворення синусоїдальності фазних струмів THD (%)

Проте результати тижневого моніторингу на основі 10 хвилинних середньоквадратичних значень показали, що TDD струму (рис. 8) всіх трьох фаз перевищує граничне значення 5% у фазі А – 38,9% часу, фазі В – 51,1% і фазі С – 6,9%. Отже у всіх фазах є порушення вимоги стандарту 95% процентиль в межах 5%. В розрізі окремих гармонік протягом тижня перевищення 95 процентиль допустимих значень були зафіксовані для 3 і 5 гармонік фаз А і В (рис. 9).

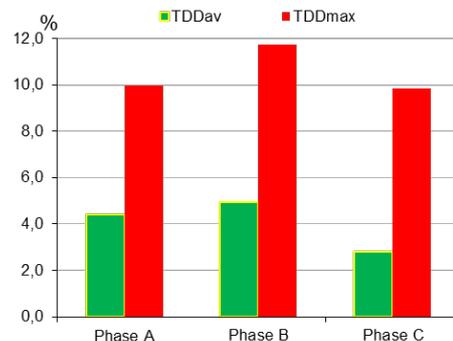


Рис. 8. Середні і максимальні значення TDD струму протягом тижня

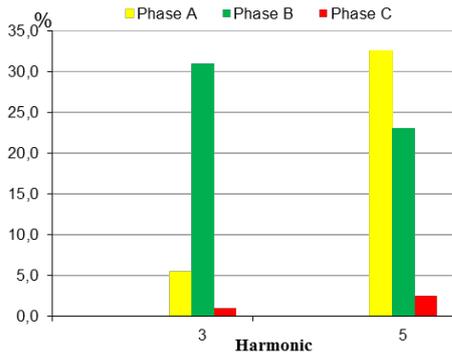


Рис. 9. Відсоток вимірів з перевищенням граничних значень протягом тижня

На рис. 10–12 наведено індивідуальні коефіцієнти гармонік струмів (середні і найбільші значення) відносно максимального струму споживання ІЛ в точці РСС за результатами моніторингу протягом тижня.

Короточасні вимірювання значень окремих гармонік протягом доби не перевищували двократних граничних значень, зазначених в табл. 1.

Більшість фідерних ліній також мали високі струмові нелінійні спотворення понад допустимі межі. Враховуючи, що напруга є практично синусоїдальною існує потреба у обмеженні гармонік струму для низьковольтних електроприймачів та визначені частки, яку вони вносять в загальне спотворення форми струму.

Стандарт IEEE 1159-2019 [13] визначає практичні рекомендації щодо моніторингу електричних характеристик однофазних та багатифазних систем змінного струму. Він включає описи електромагнітних явищ, що відбуваються в енергосистемах. Ця рекомендована практика представляє визначення номінальних умов та відхилень від цих номінальних умов, які можуть виникати у джерела постачання або завантажувального обладнання або можуть виникати від взаємодії між джерелом та навантаженням. Також у практичних рекомендаціях описано методи вимірювання та застосування, інтерпретації результатів моніторингу.

Для моніторингу вищих гармонік струму рекомендується використовувати інформаційну панель PQ системи енергетичного контролю Power Monitoring System (PME) для кількісної оцінки показань. Для правильного визначення вкладу окремих електроприймачів в сумарне спотворення форми кривої струму і напруги рекомендується встановлювати прилади як на головному вводі ТП, так і на відходячих лініях. Для цього можуть бути використані прилади фірми Schneider Electric (рис. 13).

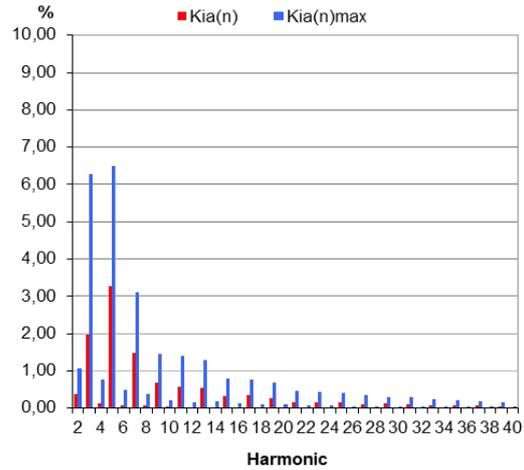


Рис. 10. Коефіцієнти гармонічних складових струму фази А

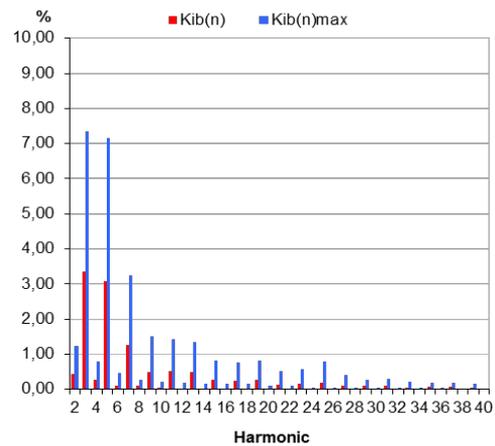


Рис. 11. Коефіцієнти гармонічних складових струму фази В

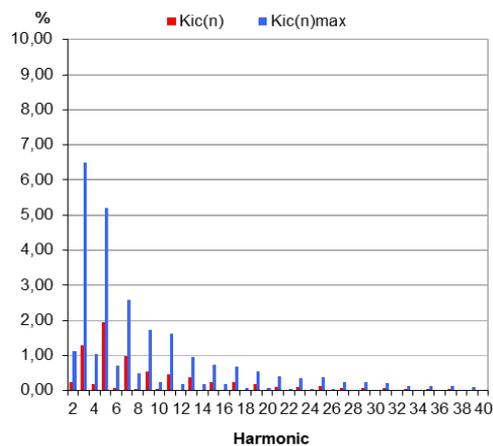


Рис. 12. Коефіцієнти гармонічних складових струму фази С

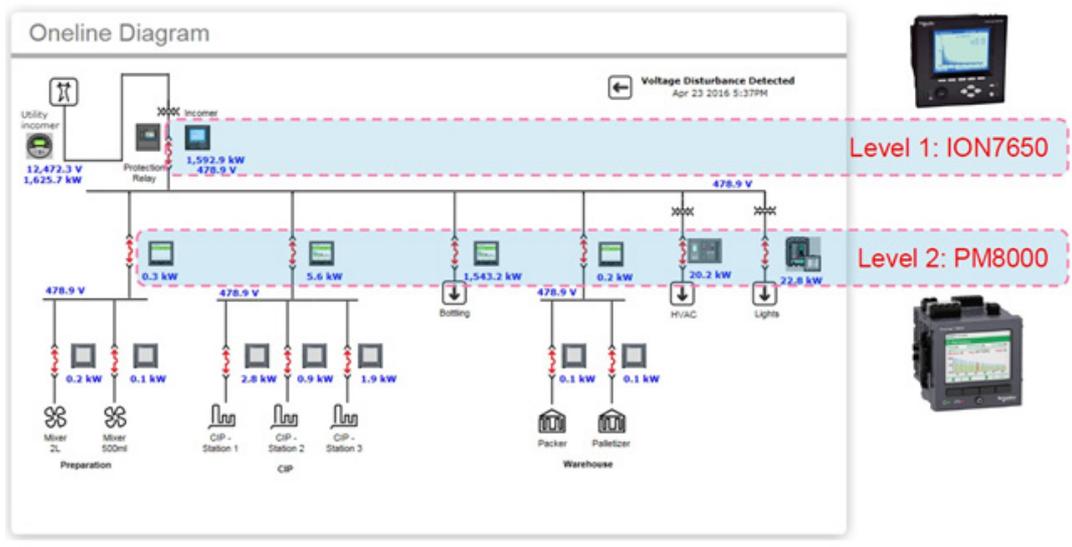


Рис. 13. Рекомендована схема моніторингу вищих гармонік в точках спільного приєднання

Для підвищення якості електроенергії, вкрай важливо, щоб споживачі електроенергії обмежували рівні гармонік струму шляхом установки пасивних, або активних фільтрів гармонік.

В населених пунктах з високим рівнем гармонік доцільно використовувати НМТс трансформатори, або групові активні фільтри вищих гармонік на трансформаторних підстанціях.

Висновки. Коефіцієнт спотворення синусоїдальної кривої напруг THD на шинах 0,4 кВ трансформаторної підстанції не перевищував 8%. Рівень окремих гармонік напруги не перевищував 5%.

В точках спільного приєднання необхідно перейти на контроль спотворення загального споживання струму TDD замість THD.

Для контролю рівнів вищих гармонік в точках спільного приєднання необхідно використовувати стандарт IEEE 519-2014.

Протягом доби значення TDD струму на ввіді 0,4 кВ трансформаторів перевищували двократні граничні величини згідно стандарту IEEE 519-2014 у фазі В протягом 4,4% часу доби і незначно у фазі С – 0,1% при допустимих 1 процентиль.

За результатами тижневого моніторингу, на основі 10 хвилинних середньоквадратичних значень, TDD струму всіх трьох фаз перевищували граничне значення (5%) у фазі А – 38,9% часу, фазі В – 51,1% і фазі С – 6,9%. Отже у всіх фазах є порушення вимоги стандарту – 95% процентиль в межах 5%.

В розрізі окремих гармонік протягом тижня перевищення 95 процентиль допустимих значень були зафіксовані для 3 і 5 гармонік фаз А і В, значення яких сягало 7% максимального струму споживання в точці РСС. Перевищення граничних значень фіксувались більше 30% часу моніторингу. Це не відповідає стандарту IEEE 519-2014.

Для моніторингу рівнів вищих гармонік в точках спільного приєднання необхідно використовувати сучасні прилади, які дозволяють моніторити THD напруг і TDD струмів з використанням практичних рекомендацій стандарту IEEE 1159-2019.

Необхідно контролювати рівні вищих гармонік струму окремих електроприймачів і вживати заходів до стимулювання їх обмеження.

На підстанціях населених пунктів з високим рівнем гармонік струмів доцільно встановлювати НМТс трансформатори та активні фільтри гармонік.

Список літератури:

1. Сиченко В. Г. Якість електричної енергії у тягових мережах електрифікованих залізниць / В.Г. Сиченко, Ю. Л. Саєнко, Д. О. Босий. – Дн-вськ: Вид-во ПФ «Стандарт-Сервіс», 2015. 344 с.
2. Burbelo, M., Pijarski, P., Zavadskiy, V., Koczorowska-Gazda, F., Melnychuk, L., Loboda, Y. Measurement of reactive power under asymmetrical nonsinusoid modes of electric networks with earthed neutral. Proc. SPIE 10031, Photonics Applications in Astronomy, Communications, Industry, and High-Energy Physics Experiments 2016, 100311X (28 September 2016); <https://doi.org/10.1117/12.2248788>.
3. Farooq, H., Zhou, C., Farrag, M.E. Analyzing the Harmonic Distortion in a Distribution System Caused by the Non-Linear Residential Loads. *International Journal of Smart Grid and Clean Energy*, vol. 2, no. 1, January 2013: pp. 46–51. doi: 10.12720/sgce.2.1.46-51

4. H. Aoyang, Y. Litao, W. Li, J. Xu, S. Wenhui and B. Yunfan. Research on the influence of urban metro traction power supply system on power grid harmonics, 2017 First International Conference on Electronics Instrumentation & Information Systems (EIIS), Harbin, 2017, pp. 1-4. doi: 10.1109/EIIS.2017.8298567
5. A. Mansoor, W. M. Grady, A. H. Chowdhury and M. J. Samoty. An investigation of harmonics attenuation and diversity among distributed single-phase power electronic loads. Proceedings of IEEE/PES Transmission and Distribution Conference, Chicago, IL, USA, 1994, pp. 110-116. doi: 10.1109/TDC.1994.328369
6. Chandran, C., Sunderland, K. & Basu, M. (2018). An analysis of harmonic heating in smart buildings and distribution network implications with increasing non-linear (domestic) load and embedded generation. Renewable Energy, vol. 126, pg. 524-536. doi:10.1016/j.renene.2018.03.081
7. Kowalak, R., Czapp, S., Dobrzynski, K., Klucznik, J., Lubosny Z. Harmonics produced by traction substations – computer modelling and experimental verification. Przegląd Elektrotechniczny 2017, №6, p.13-18. doi:10.15199/48.2017.06.04
8. Ngoo, L., Nderu, J. N., Ndungu, C.M. Analysis of Harmonic order levels at Power Lines to Improve the Power Quality. Sustainable Research and Innovation Proceedings. Vol 5 (2013). <http://ir.jkuat.ac.ke/handle/123456789/2818>
9. IEEE 519-2014 – IEEE Recommended Practice and Requirements for Harmonic Control in Electric Power Systems. The IEEE, Inc. 3 Park Avenue, New York, NY 10016-5997, USA. Approved 27 March 2014.
10. Соломчак О.В. Дослідження електрофізичних характеристик дугових газорозрядних ламп / О.В. Соломчак, І.В. Гладь. // *Світлотехніка та електроенергетика*. – 2009. – № 4. – С. 47–52.
11. Соломчак О.В. Реактивна потужність та електромагнітна сумісність світильників з газорозрядними лампами / О. В. Соломчак, І. В. Гладь. // *Промелектро*. – 2011. – № 4-5. – С. 40–43.
12. Соломчак О. В. Електромагнітна сумісність нелінійних побутових електроприладів. / О. В. Соломчак, А. О. Соломчак // *Сучасні проблеми систем електропостачання промислових та побутових об'єктів. Збірник наукових праць I Міжнародної науково-технічної конференції викладачів, аспірантів і студентів.* – Донецьк, 2013. – (ДонНТУ). – С. 42–43.
13. IEEE 1159-2019. IEEE Recommended Practice for Monitoring Electric Power Quality. The IEEE, Inc. 3 Park Avenue, New York, NY 10016-5997, USA. Approved 13 June 2019.

Solomchak O.V., Solomchak A.O. MEASUREMENT OF HIGHER HARMONICS OF CURRENTS AND VOLTAGE AT POINTS OF COMMON CONNECTION OF DISTRIBUTION ELECTRICAL NETWORKS

The increase in energy consumption by residential and communal consumers and the densification of urban areas have led to an increase in the load on transformers and their operation at the limit of nominal power. This causes the saturation of the magnetic core and clipping of the voltage sinusoid peaks. Simultaneously, the number and power of nonlinear electrical receivers are increasing, leading to the appearance of higher harmonics of currents and voltages in electrical networks. Analysis of recent studies shows that the problem of nonsinusoidal voltages and currents remains relevant. Mathematical modeling does not provide reliable solutions for the grouped loads of transformer substations. The aim of this work is to measure and analyze the nonsinusoidal currents and voltages of transformer substation loads, study the harmonic composition of grouped loads, and their compliance with international standards. A series of measurements of nonsinusoidal currents and voltages of transformer substation loads in populated areas were conducted. The harmonic composition of grouped loads and their compliance with international standards were studied. The Total Harmonic Distortion (THD) coefficient of the sinusoidal voltage curve on the 0.4 kV busbars of the transformer substation was within the norm. According to the results of weekly monitoring, the exceedance of the TDD current limit values was recorded more than 30% of the monitoring time, which does not comply with the IEEE 519-2014 standard. For monitoring the levels of higher harmonics at points of common coupling, it is recommended to use modern devices that allow controlling voltage THD and current TDD using the practical recommendations of the IEEE 519-2014 and IEEE 1159-2019 standards. Measures to limit the levels of higher harmonics at substations in populated areas have been proposed.

Key words: harmonic distortion, point of common coupling, harmonic monitoring, non-linear loads, harmonic measurements, electric power quality, total harmonic distortion, total demand distortion, urban substation.

Стаценко Д.В.

Київський національний університет технологій та дизайну

Стаценко В.В.

Київський національний університет технологій та дизайну

Злотенко Б.М.

Київський національний університет технологій та дизайну

Демішонкова С.А.

Київський національний університет технологій та дизайну

ЗАСТОСУВАННЯ МОДЕЛЕЙ МАШИННОГО НАВЧАННЯ ДЛЯ ОПТИМІЗАЦІЇ УПРАВЛІННЯ ІНТЕЛЕКТУАЛЬНИМИ МЕРЕЖАМИ ВІДНОВЛЮВАЛЬНИХ ДЖЕРЕЛ ЕНЕРГІЇ

В роботі проведено дослідження пов'язані з застосуванням моделей машинного навчання для оптимізації управління інтелектуальними мережами, які під'єднанні до відновлювальних джерел енергії. У статті зазначено, що за останні роки відновлювальні джерела енергії починають займати важливе значення у багатьох галузях людської діяльності. Для оптимізації їх використання останнім часом використовуються інтелектуальні мережі, які дозволяють уникнути витрат енергії та знизити ризики різноманітних ймовірних збоїв.

Аналіз літератури показав, що алгоритми машинного навчання використовувалися для аналізу даних від датчиків, прогнозування попиту енергію із заданою точністю, оптимізація зберігання, розподілу енергії, планування систем зберігання енергії в мікромережі, оптимізації розміщення систем зберігання енергії у розподільній мережі, підвищуючи надійність та ефективність мережі.

В статті наведено два алгоритми для моделей машинного навчання для навчання однорівневих мереж прямого розповсюдження. Експериментальні результати попередніх досліджень підтвердили ефективність алгоритму машинного навчання за рахунок надзвичайно швидкого навчання з високою продуктивністю узагальнення порівняно із традиційними однорівневими мережами.

Зазначено, що оптимізація рою частинок, алгоритм оптимізації, який використовує сукупність частинок для пошуку оптимального рішення. Кожна частка має вектор положення та вектор швидкості, які оновлюються ітераційно на основі найкращого положення частинки та глобального найкращого становища рою.

Виконані розрахунки та порівняння із існуючими алгоритмами на основі штучної нейронної мережі, результати чого запропонований алгоритм дозволяє покращити точність прогнозування змін споживання та генерації відновлюваної енергетики та знижує витрати на електроенергію за рахунок оптимізації параметрів алгоритму машинного навчання.

Ключові слова: система регулювання, завдання споживаної з мережі потужності, прогноз генерації, сценарії управління, управління енергоспоживанням, інтелектуальні мережі, відновлювальні джерела енергії, моделі машинного навчання.

Постановка проблеми. Сьогодні відновлювані джерела енергії (ВДЕ) займають важливе місце у розвитку багатьох галузей людської діяльності. Їх використання в сучасних мережах стикається з рядом проблем, вирішенням яких займається багато українських та іноземних спеціалістів. Одним з елементів, який використовується з ВДЕ, є застосування інтелектуальних мереж. Управління ВДЕ за допомогою інтелектуальних мережах стикається з проблемами

пов'язаними з невизначеністю та мінливістю ВДЕ. Для вирішення даних проблем існують декілька різних методів. Одним з таких методів є використання машин екстремального навчання (ELM) для оптимізації управлінням ВДЕ в інтелектуальних мережах.

Електрична мережа, що складається з відновлюваних джерел енергії, інтелектуальних приладів, інтелектуальних лічильників та енергоефективних ресурсів, називається інтелектуальною

мережею. Області інтелектуальних мереж включають масову і немасову генерацію, клієнтів, постачальників послуг, розподіл, передачу, базову систему підтримки, ринки та операції. Передовий захист, система зв'язку, підтримка клієнтів, система зберігання енергії, транспортні засоби, що підключаються, розподілені джерела енергії та програми реагування на попит – це піддомени інтелектуальної мережі.

Інтелектуальні мережі мають переваги та забезпечують більшу ефективність, надійність та безпечність доставки електроенергії до користувачів з додатковими можливостями зв'язку та управління. Вони можуть відслідковувати та управляти потоком енергії у реальному часі [1, 2].

В результаті чого знижуються втрати енергії та ймовірність збоїв, наприклад відключення електроенергії.

За своєю природою ВДЕ, на даний момент, важко спрогнозувати, що призводить до коливань енергії, змін у генерації та споживанні.

Використання інтелектуальних мереж може вирішити питання коливань за рахунок використання передових датчиків, систем автоматизації та контролю для балансування генерації та споживанні енергії в режимі реального часу [3-5].

Управління енергією в інтелектуальних мережах призведе до зменшення викидів парникових газів, що в свою чергу позитивно вплине на захист навколишнього середовища. Оптимізуючи розподіл та зберігання енергії, інтелектуальні мережі можуть знизити потребу в джерелах енергії на основі викопного палива та підтримати інтеграцію відновлюваних джерел енергії [6]. Загалом управління енергією в інтелектуальних мережах має важливе значення для створення більш ефективного, надійного та стійкого енергетичного майбутнього. Оптимізація управління відновлюваними джерелами енергії відноситься до процесу використання передових методів та технологій для максимізації ефективності та результатив-

ності систем відновлюваної енергії в енергосистемі. Це включає аналіз величезних обсягів даних від датчиків та інших джерел для прогнозування моделей генерації та споживанні енергії, оптимізації зберігання та розподілу енергії, а також забезпечення стабільності мережі [7, 8].

Машинне навчання (МН) – галузь дослідження штучного інтелекту, зосереджена на розробці та вивченні статистичних алгоритмів, здатних “навчатися” використовуючи дані та узагальнюватися на них, відповідно виконувати завдання без наявних інструкцій. Алгоритми машинного навчання можна використовувати для аналізу даних від датчиків інтелектуальних мереж та прогнозування моделей генерації та споживанні енергії з високою точністю.

Це може допомогти операторам мереж оптимізувати розподіл, зберігання та використання енергії, а також мінімізувати втрати енергії [9].

Інші методи оптимізації управління відновлюваною енергією включають передові системи зберігання енергії, програми реагування на споживання та технології балансування мережі. Системи зберігання енергії, такі як батареї, можуть використовуватися для зберігання надлишкової енергії, що виробляється відновлюваними джерелами у періоди низького та високого попиту. Програми реагування на попит можуть стимулювати споживачів скорочувати споживання енергії в періоди пікового попиту, що допоможе збалансувати енергосистему і знизити потребу в джерелах енергії [10]. Технології балансування мережі, такі як гнучкі міжмережні з'єднання та інтелектуальні інвертори, можуть допомогти збалансувати попит та пропозицію енергії у різних регіонах та періодах часу.

Відновлювані джерела енергії, такі як сонячна, вітрова та гідроенергетика, відіграють вирішальну роль у скороченні викидів вуглекислого газу. Інтелектуальні мережі з їх розширеними можливостями зв'язку та управління пропонують

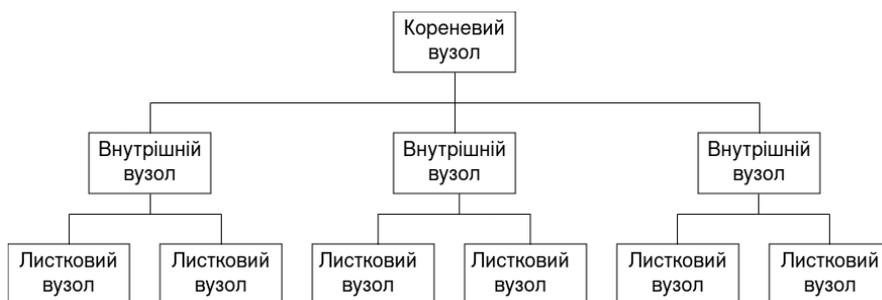


Рис. 1. Управління відновлюваною енергією в інтелектуальних мережах

перспективну платформу для інтеграції відновлюваних джерел енергії в енергосистему [10-11]. Методи МН стали потужним інструментом оптимізації керування відновлюваними джерелами енергії в інтелектуальних мережах. Алгоритми машинного навчання можуть аналізувати величезні обсяги даних від датчиків інтелектуальних мереж та прогнозувати структуру попиту та пропозиції енергії, оптимізувати зберігання та розподіл енергії, а також забезпечувати стабільність мережі. У даній роботі розглядаються різні методи машинного навчання, які можна використовувати для оптимізації управління відновлюваними джерелами енергії в інтелектуальних мережах, їх переваги, обмеження та проблеми [6].

Аналіз останніх досліджень і публікацій. У кількох дослідженнях алгоритми машинного навчання використовувалися для аналізу даних від датчиків інтелектуальних мереж і прогнозування попиту енергію із заданою точністю [12].

Ще одним застосуванням машинного навчання в управлінні відновлюваними джерелами енергії є оптимізація зберігання та розподілу енергії. У дослідженні використовувався алгоритм навчання з підкріпленням для оптимізації планування систем зберігання енергії в мікромережі, що дозволило досягти значного зниження витрат на електроенергію та пікового попиту. Аналогічним чином проводилися дослідження з використанням генетичного алгоритму для оптимізації розміщення систем зберігання енергії у розподільній мережі, підвищуючи надійність та ефективність мережі [9] [13].

У кількох дослідженнях також вивчалось використання машинного навчання для прогнозування вироблення поновлюваної енергії. Наприклад, в дослідженні використовувалася нейронна мережа для прогнозування генерації сонячної фотоелектричної енергії з точністю більше 95%. У інших дослідженнях використовували алгоритм глибокого навчання для прогнозування вироблення енергії вітру, досягнувши точності понад 90% [14].

Крім методів МН, також були досліджені інші стратегії оптимізації для управління відновлюваною енергією в інтелектуальних мережах. Було запропоновано гібридний алгоритм оптимізації, який поєднує в собі нечітку логіку та оптимізацію рою частинок для оптимізації виробництва та розподілу відновлюваної енергії в мікромережі [3].

Постановка завдання. Метою статті є застосування моделей машинного навчання з оптимізацією рою частинок для оптимізації управління

інтелектуальними мережами відновлювальних джерел енергії.

Виклад основного матеріалу. Модель машинного навчання (МН) для навчання однорівневих мереж прямого розповсюдження (ОМНР) на надзвичайно високих швидкостях. Єдині параметри, що вимагають навчання, – це ваги між останнім прихованим шаром та вихідним шаром. Експериментальні результати попередніх досліджень підтвердили ефективність алгоритму МН за рахунок надзвичайно швидкого навчання з гарною продуктивністю узагальнення порівняно із традиційними ОМНР. Функцію МН можна записати як

$$f(x_i) = \sum_{l=1}^L \beta_l h_l(x) = h(x) B \quad (1)$$

де $x_i = [x_{i1}, x_{i2}, \dots, x_{iN}] \in R^N$ – вхідний вектор, $\omega_l = [\omega_{l1}, \omega_{l2}, \dots, \omega_{lN}] \in R^N$ – ваговий вектор, з'єднує l -й прихований вузол і вхідний вектор, це упередженість l -ого прихованого вузла, $\beta_l = [\beta_{l1}, \beta_{l2}, \dots, \beta_{lN}] \in R^M$ – ваговий вектор l -й прихований вузол до вихідних вузлів, L – будь-яка кількість прихованого цільового шару МН, $\sigma(\cdot)$ – нелінійна функція активації, що дозволяє апроксимувати цільову функцію до компактного підмножини. Для вихідної функції можна зазначити, що B -вихідна вагова матриця, та $h(x) = [h_1(x), \dots, h_L(x)]$ – це нелінійне відображення об'єктів.

$$Hb = \gamma \quad (2)$$

де H – це вихідні дані прихованого шару, матриця і γ – цільова матриця даних.

$$H = \begin{bmatrix} \sigma(w_1 x_1 + b_1) & \dots & \sigma(w_L x_L + b_L) \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \sigma(w_1 x_n + b_1) & \dots & \sigma(w_1 x_n + b_1) \end{bmatrix}_{N \times L} \quad (3)$$

$$\beta = \begin{bmatrix} \beta_1^T \\ \vdots \\ \beta_L^T \end{bmatrix}, \text{ та } \gamma = \begin{bmatrix} \gamma_1^T \\ \vdots \\ \gamma_L^T \end{bmatrix}_{N \times M} \quad (5)$$

$$B = H^+ \gamma \quad (6)$$

де H^+ псевдоінверсія Мура-Пенроуза H , яку можна обчислити з використанням різних методів, таких як методи ортогонального проектування, метод виключення Гауса і однозначне розкладання, вхідний шар позначається X , прихований шар – H , вихідний шар – Y , а кількість нейронів у прихованому шарі – N . Вихідні дані прихованого шару визначаються за формулою:

$$H = g(WX + b) \quad (7)$$

де W – матриця переходу вхідних до прихованих вагів, b – вектор зміщення, а g – функція активації.

Функція активації, яка використовується в МЕН, зазвичай є сигмовидною або радіальною базисною функцією.

Вихідні дані моделі ELM визначаються так:

$$H = HW_{out} \quad (8)$$

Оптимізація рою частинок (ОРЧ) – алгоритм оптимізації, який використовує сукупність частинок для пошуку оптимального рішення. Кожна частка має вектор положення та вектор швидкості, які оновлюються ітераційно на основі найкращого положення частинки та глобального найкращого становища рою.

Положення та швидкість кожної частки оновлюються наступним чином:

$$v_i(t+1) = wv_i(t) + c_1r_1(p_i - x_i(t)) + c_2r_2(g - x_i(t)) \quad (9)$$

$$x_i(t+1) = x_i(t) + v_i(t+1) \quad (10)$$

де $v_i(t)$ та $x_i(t)$ – швидкість і положення частки i в момент часу t , w – інерційна вага, c_1 та c_2 – константи прискорення, r_1 та r_2 – випадкові числа між 0 та 1, – особисте найкраще положення частки i , а g – глобальне найкраще положення рою.

Модель МН можна оптимізувати за допомогою ОРЧ, щоб знайти оптимальні значення вхідної матриці прихованих ваг W та вектора зміщення b . Функція придатності, що використовується в алгоритмі ОРЧ, є середньоквадратичною помилкою між прогнозованим вихідним сигналом моделі МН і фактичним вихідним сигналом.

Вектор положення кожної частинки в рої є можливим розв'язанням задачі оптимізації, тобто набір значень W і b . Швидкість кожної частки представляє напрямок і величину зміни положення. Найкраще становище кожної частки оновлюється, якщо значення пристосованості покращується, при цьому оновлюється також глобальне найкраще становище рою.

Після того, як алгоритм ОРЧ зійдеться, оптимальні значення W і b можна використовувати для прогнозування моделей попиту та пропозиції енергії, оптимізації зберігання та розподілу енергії, а також покращення керування відновлюваними джерелами енергії в інтелектуальних мережах.

Для перевірки ефективності використання запропонованого алгоритму оптимізації рою частинок проведено розрахунки середньоквадратичної помилки та нормалізованого середньоквадратичної помилки для двох випадків.

В першому використовуємо результати розрахунку алгоритму на основі штучної нейронної мережі (ШНМ), в другому результати запропонованого алгоритму моделі машинного навчання з оптимізацією рою частинок (МН ОРЧ).

Розрахунок проводився для трьох інтелектуальних мереж ВДЕ, а саме:

1. Вітрової енергії.
2. Гідроенергетики.
3. Сонячної енергії.

На рис. 2 показана порівняльна діаграма середньоквадратичної помилки, що демонструє різні значення існуючої ШНМ та запропонованого алгоритму МН ОРЧ. Вісь Y відповідає за набір даних вищезазначених мереж, а вісь X вказує на частоту помилок.

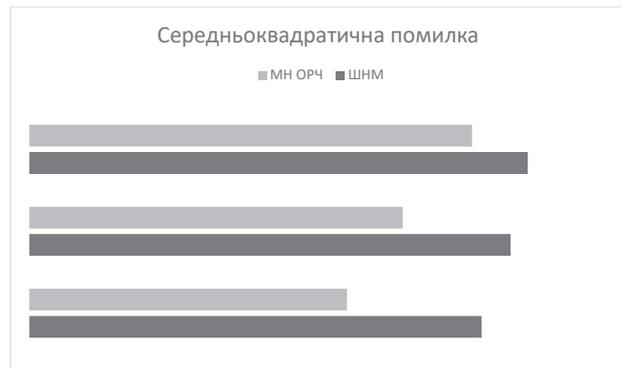


Рис. 2. Порівняльна діаграма середньоквадратичної помилки

Відповідно до отриманих значень ефективність запропонованого алгоритму складає в середньому 21,1%. Найкращий результат показує розрахунки для інтелектуальних мереж ВДЕ на основі вітрової енергії, найменший для сонячної.

На рис. 3 показана порівняльна діаграма нормалізованої середньоквадратичної помилки, що демонструє різні значення існуючої ШНМ та запропонованого алгоритму МН ОРЧ.

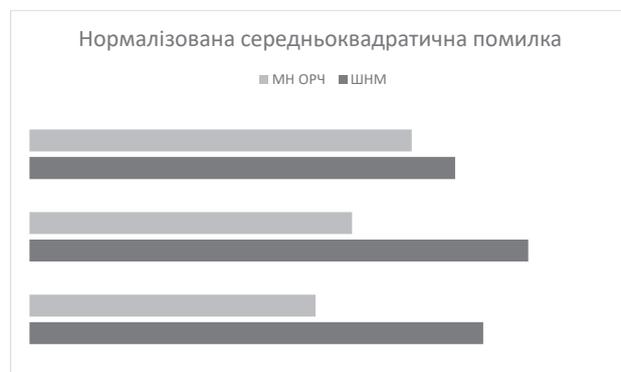


Рис. 3. Порівняльна діаграма нормалізованої середньоквадратичної помилки

Як і в попередньому випадку ефективність алгоритму МН ОРЧ показує кращі результати і складає в середньому 27,5%.

Висновки. В статті розглянуто використання алгоритму моделі машинного навчання з оптимізацією рою частинок для оптимізації керування системами відновлюваних джерел енергії в інтелектуальних мережах.

Запропонований підхід дозволяє покращити точність прогнозування змін споживання та генерації відновлюваної енергетики та знизити витрати

на електроенергію за рахунок оптимізації параметрів алгоритму машинного навчання.

Отримані результати вказують на те, що підхід НМ ОРЧ має більш ефективні показники точності прогнозування та зниження витрат ніж інші методи оптимізації. Запропонований підхід може бути використаний у різних інтелектуальних системах відновлюваної енергетики.

Список літератури:

1. Kumar, K.P.; Saravanan, B. Recent techniques to model uncertainties in power generation from renewable energy sources and loads in microgrids. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 71, pp 348–358, 2017.
2. Leonori, S.; Martino, A.; Frattale Mascioli, F.M.; Rizzi, Microgrid Energy Management Systems Design by Computational Intelligence Techniques. *Appl. Energy*, Vol. 277, 115524, 2020.
3. Cabrera-Tobar, A.; Massi Pavan, A.; Blasuttigh, N.; Petrone, G.; Spagnuolo, G. Real time Energy Management System of a photovoltaic based e-vehicle charging station using Explicit Model Predictive Control accounting for uncertainties *Energy Grids Netw.* Vol. 31, 100769, 2022.
4. Zia, M.F.; Elbouchikhi, E.; Benbouzid, M. Microgrids energy management systems: A critical review on methods, solutions, and prospects *Appl. Energy*, Vol. 222, pp. 1033–1055, 2018.
5. Meng, L.; Sanseverino, E.R.; Luna, A.; Dragicevic, T.; Vasquez, J.C.; Guerrero, J.M. Advanced energy management strategy for microgrid using real-time monitoring interface *Renew. Sustain. Energy Rev.* Vol. 60, pp. 1263–1273, 2016.
6. Ullah, Z.; Wang, S.; Wu, G.; Xiao, M.; Lai, J.; Elkadeem, M.R. Advanced energy management strategy for microgrid using real-time monitoring interface. *Energy Storage*, Vol. 52, 104814, 2022.
7. Agüera-Pérez, A.; Palomares-Salas, J.C.; González de la Rosa, J.J.; Florencias-Oliveros, O. Weather forecasts for microgrid energy management: Review, discussion and recommendations. *Appl. Energy*, Vol. 228, 265–278, 2018.
8. Raya-Armenta, J.M.; Bazmohammadi, N.; Avina-Cervantes, J.G.; Sáez, D.; Vasquez, J.C.; Guerrero, J.M. Energy management system optimization in islanded microgrids: An overview and future trends. *Renew. Sustain. Energy Rev.*, Vol. 149, 111327, 2021.
9. Zhu, J.; Dong, H.; Zheng, W.; Li, S.; Huang, Y.; Xi, L. Review and prospect of data-driven techniques for load forecasting in integrated energy systems. *Appl. Energy*, Vol. 321, 119269, 2022.
10. Ali, S.; Zheng, Z.; Aillerie, M.; Sawicki, J.P.; Péra, M.C.; Hissel, D. Energy management system optimization in islanded microgrids: An overview and future trends. *Energies*, Vol. 14, 4308, 2021.
11. Brearley, B.J., Bose, K.R., Senthil, K., Ayyappan, G. KNN approaches by using ball tree searching algorithm with minkowski distance function on smart grid data. *Indian Journal of Computer Science and Engineering*, Vol.13, no.4, pp.1210-1226, 2022.
12. Leonori, S.; Martino, A.; Frattale Mascioli, F.M.; Rizzi, Microgrid Energy Management Systems Design by Computational Intelligence Techniques. *Appl. Energy*, Vol. 277, 115524, 2020.
13. Macana, C.A.; Mojica-Nava, E.; Pota, H.R.; Guerrero, J.; Vasquez, J.C. A distributed real-time energy management system for inverter-based microgrids. *Electr. Power Syst. Res.*, Vol. 213, 108753, 2022.
14. Carli, R.; Cavone, G.; Pippia, T.; De Schutter, B.; Dotoli, M.. Robust Optimal Control for Demand Side Management of Multi-Carrier Microgrids. *IEEE Trans. Autom. Sci. Eng.*, Vol. 19, 1338–1351, 2022.

Statsenko D.V., Statsenko V.V., Zlotenko B.M., Demishonkova S.A. APPLICATION OF MACHINE LEARNING MODELS TO OPTIMIZE MANAGEMENT OF RENEWABLE ENERGY SOURCES INTELLIGENT NETWORKS.

In the work, research is conducted related to the application of machine learning models to optimize the management of intelligent networks connected to renewable energy sources. The article states that in recent years, renewable energy sources are beginning to play an important role in many areas of human activity. To optimize their use, intelligent networks have recently been used to avoid energy losses and reduce the risks of various possible failures.

The analysis of the literature showed that machine learning algorithms were used to analyze data from sensors, predict energy demand with a given accuracy, optimize storage, energy distribution, plan energy storage systems in microgrids, optimize the placement of energy storage systems in the distribution network, increasing the reliability and efficiency of the network.

The article presents two algorithms for machine learning models for training one-level forward propagation networks. Experimental results of previous studies have confirmed the effectiveness of the machine learning algorithm due to extremely fast learning with high generalization performance compared to traditional single-level networks.

It is stated that particle swarm optimization, an optimization algorithm that uses a collection of particles to find an optimal solution. Each particle has a position vector and a velocity vector that are updated iteratively based on the particle's best position and the global best swarm position.

Calculations and comparisons with existing algorithms based on an artificial neural network were performed, the results of which the proposed algorithm improves the accuracy of forecasting changes in the consumption and generation of renewable energy and reduces electricity costs due to the optimization of machine learning algorithm parameters.

Key words: *regulation system, task of power consumed from the network, generation forecast, control scenarios, energy consumption management, intelligent networks, renewable energy sources, machine learning models.*

Тарновецька О.Ю.

Чернівецький національний університет імені Юрія Федьковича

Осадчук Р.Р.

Software Engineer, Ajax Systems

ДОСЛІДЖЕННЯ МЕТОДІВ ВЗАЄМОДІЇ МІЖ СЕРВІСАМИ ПРИ МІКРОСЕРВІСНІЙ АРХІТЕКТУРІ ПРОГРАМНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ

Метою даною роботи було вивчення наявних методів взаємодії між компонентами програмного продукту, створеного з використанням мікросервісної архітектури. Автори провели детальний аналіз різноманітних протоколів, що використовуються для взаємодії мікросервісів. У процесі дослідження було визначено загальну структуру цих протоколів, основні характеристики їх алгоритмів роботи, процеси передачі даних та способи застосування в контексті мікросервісної архітектури. Особлива увага була приділена таким протоколам, як HTTP/REST та AMQP, які забезпечують різні рівні продуктивності, надійності та зручності використання.

Для демонстрації можливостей мікросервісної архітектури та різних методів інтеграції між сервісами, було розроблено програмне забезпечення (ПЗ), призначене для моніторингу робочого часу підлеглих на підприємстві. Це програмне забезпечення включає набір мікросервісів, кожен з яких виконує окрему задачу, пов'язану з моніторингом, збиранням та аналізом даних про робочий час співробітників.

Одним з ключових етапів дослідження стало визначення найбільш оптимального протоколу взаємодії між компонентами програмного продукту. Для цього було створено ряд тест-кейсів, які моделюють різні сценарії використання програмного забезпечення в умовах реального підприємства. На основі цих тест-кейсів було проведено стрес-тестування, яке дозволило оцінити поведінку прототипів програмного продукту під різними навантаженнями. Це включало моделювання високих навантажень, перевірку стабільності роботи при тривалих запусках та оцінку відмовостійкості системи.

Отримані дані в результаті тестування були ретельно проаналізовані, а виявлені закономірності обґрунтовані. На основі проведеного аналізу було визначено, які протоколи та методи взаємодії забезпечують найбільшу продуктивність, надійність та стабільність роботи програмного забезпечення в умовах реального використання. Ці результати стали основою для формулювання рекомендацій щодо вибору способів інтеграції мікросервісів в процесі планування та розробки нового програмного продукту (ПП).

Ключові слова: мікросервіс, протокол, система, взаємодія, подія, передача даних.

Постановка проблеми. В сучасній розробці ПЗ (програмного забезпечення) все частіше практикується використання мікросервісної архітектури замість звичної монолітної. Оскільки мікросервісне програмне забезпечення базується на розподілі задач між окремими компонентами – мікросервісами, виникає проблема вибору ефективного методу їх інтеграції. Однак, використання певного методу взаємодії між мікросервісами має свої наслідки та впливає на процес розробки, функціонування та підтримки програмного забезпечення. Проведене в цій роботі дослідження та аналіз допоможуть визначити ключові фактори, за яких слід будувати зв'язки між сервісами в мікросервісній архітектурі, використовуючи відповідний підхід до їх комунікації.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Проблеми побудови програмного забезпечення

з використання мікросервісного архітектурного підходу, а також процеси взаємодії між компонентами програмного продукту, були описані чималою кількістю авторів та вчених у своїх публікаціях та науковій літературі. Зокрема, такий мікросервісну архітектуру розглядали Адам Беламейр (Adam Bellamare) [1], Джон Кернел (John Carnell) [6], Сем Ньюман (Sam Newman) [9]. Використання синхронних запитів та відповідей між компонентами програмного забезпечення розглянули Стефен Томас (Stephen Thomas) [3], Барі Поллард (Barry Pollard) [4] та Джим Веббер (Jim Webber) [5]. Використання асинхронної передачі подій в розробці програмного забезпечення описували Альваро Відела (Alvaro Videla) [2] та Адам Беламейр (Adam Bellamare) [1].

Постановка завдання. Метою статті є дослідження методів взаємодії між сервісами у мікро-

сервісній архітектурі програмного забезпечення, визначення найбільш оптимального методу зв'язку між компонентами для досягнення максимальної продуктивності та стабільності роботи на основі розробленого ПЗ для системи моніторингу робочого часу працівників підприємства. Встановлена мета обумовлює наступні завдання:

- дослідження та аналіз методів взаємодії між мікросервісами;
- розробка архітектури прототипу системи;
- побудова прототипів ПЗ;
- тестування розроблених ПП (прототипів програмного продукту);
- аналіз результатів отриманих в ході тестування.

Результати дослідження можуть служити як основні критерії для вибору методу взаємодії між мікросервісами під час планування розробки нового програмного продукту.

Виклад основного матеріалу. Мікросервісний архітектурний підхід являє собою спеціальний метод розробки програмного забезпечення, що ґрунтується на розробці відокремлених модулів (сервісів) з чітко визначеною поведінкою, що інтегровані між собою. Кожен з мікросервісів побудований задля вирішення конкретних бізнес-потреб і може бути розгорнутий на віддаленому сервері незалежно від інших компонентів програмного продукту. Мікросервіси можуть бути реалізовані за допомогою різних мов програмування, фреймворків бібліотек, баз даних та інших технологій для розробки ПЗ. Використання даного архітектурного підходу стало популярним в останні роки, оскільки дозволяє розробляти програмні продукти гнучкими до використання та їх подальшого розширення [9].

На рис. 1 представлено типову схему програмного продукту реалізованого за допомогою монолітної архітектури. Можна побачити, що всі блоки бізнес-логіки розташовані в одну великому монолітному додатку. На Рис.2, в свою чергу, показано типову схему мікросервісної архітектури, де кожен блок бізнес логіки монолітного програмного продукту з рис. 1 був виокремлений в окремий мікросервіс, кожен з яких являє собою невеликий додаток, що має своє унікальне призначення та чітку спеціалізацію.

Все більш часто в сучасній розробці надається перевага використанню мікросервісної архітектури за її численні переваги, серед них можна виділити основні:

1. Гнучкість – мікросервіси можуть бути реалізовані, за допомогою різних мов програму-

вання, бази даних і навколишнього середовища програмного забезпечення. Це дозволяє кожному сервісу бути розгорнутим і працювати незалежно від інших. Таким чином, будь-яка проблема з мікросервісами не впливатиме на цілу систему, і відмова певного мікросервісу може бути компенсована відносно швидко [6].

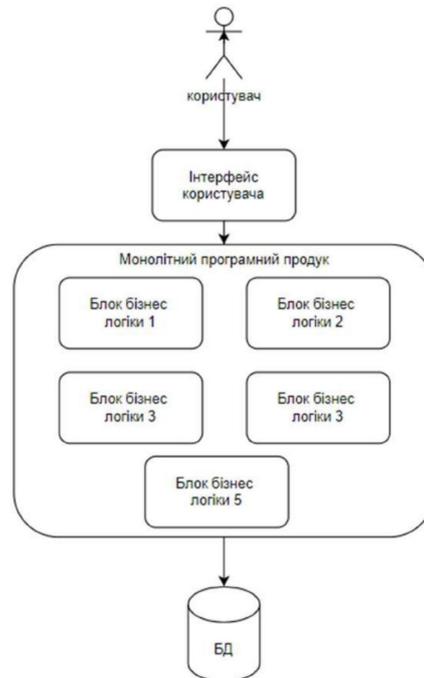


Рис. 1. Типова схема структури монолітного програмного продукту

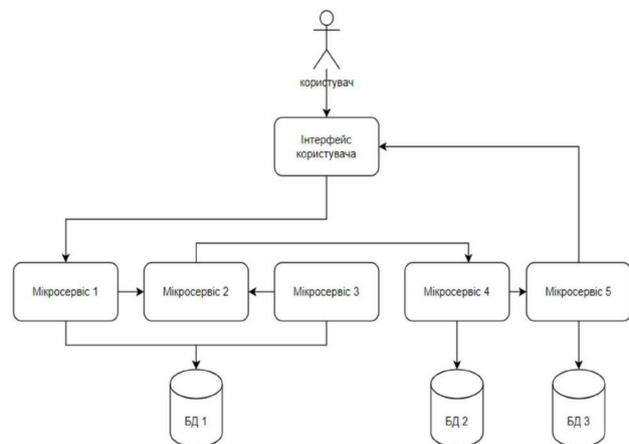


Рис. 2. Типова схема структури програмного продукту написаного з використанням мікросервісного архітектурного підходу

2. Зосередження на бізнес-вимогах – мікросервісна архітектура рекомендує розробникам зосереджуватися навколо створення конкретного бізнес функціоналу замість того, щоб писати проміжний код. Іншими словами, групи розробників відштовхуються від бізнес-вимог, які потрібно реалізувати будь-яким способом, а не від технологій.

3. Простота – кожен мікросервіс являє собою невеликий додаток, що зосереджений на конкретному переліку бізнес задач.

4. Тестування – оскільки мікросервіси реалізують конкретний аспект бізнес функціоналу, то процес тестування стає значно легшим. Кожний окремих мікросервіс може бути протестований індивідуально, з метою виявлення внутрішніх помилок, що потребують додаткового налагодження.

5. Автономність – мікросервісний архітектурний підхід є дуже зручним, якщо у розробці програмного продукту беруть участь декілька команд. Кожна з них може розробляти свій окремих мікросервіс і не залежати від сусідньої допоки не потрібно буде налаштувати інтеграцію між всіма сервісами.

Однак в мікросервісна архітектура також не є ідеалом у розробці ПЗ і приносить із собою ряд недоліків, з якими розробники змушені миритися та вживати необхідні заходи:

1. Надлишкова зв'язаність – кількість залежностей в середині програмного продукту, розробленого за допомогою мікросервісів, безпосередньо корелює з кількістю використаних сервісів [6].

2. Складність розгортання – мікросервіси вимагають досвідчених DevOps-інженерів, що здатні автоматизувати розгортання, керувати всім життєвим циклом та підтримувати працездатність мікросервісного продукту.

3. Безпека – разом із збільшенням кількості мікросервісів, збільшується кількість зв'язків комунікацій між ними, то і кількість місць у системі, які є вразливими до втрати чи перехоплення певних даних також стрімко збільшується, що значно збільшує шанси отримати несанкціонований доступ до ресурсів ПЗ.

4. Швидкодія – мікросервіси можуть стати причиною затримки у швидкості обробки дій користувача. Якщо певний мікросервіс викликає ще ряд інших мікросервісів, то загальний час обробки дій користувача триватиме довше ніж в монолітному програмному продукті в якому не буде затримки під час передачі даних між різними компонентами системи.

Правильна інтеграція є одним із найбільш важливих аспектом під час проектування архітектури ПЗ із використання мікросервісного підходу. При вдалій реалізації мікросервіси залишаться автономними, що дасть змогу легко впроваджувати новий функціонал і в кожен з них незалежно від всієї системи. Існує два основних підходи реалізації комунікації між мікросервісами: синхронний та асинхронний обмін повідомленнями.

Синхронний метод взаємодії між мікросервісами реалізований за допомогою RESTful архітектурного стилю. The Representational State Transfer (REST) – передача репрезентативного стану, насправді не є протоколом, а архітектурним стилем. Він був вперше представлений Роем Філдінгом в 2000 році і широко використовується з тих пір. Як правило, RESTful сервіси використовують безпечний і надійний протокол HTTP, який є перевіреним у мережі Інтернет. Безпека гарантується шляхом використання протоколів TLS/SSL [3].

Основними RESTful принципами є:

– Client-Server (з англ. – клієнт-сервер). Сервіс є клієнтом, коли надсилає запит з метою отримання інформації про певний ресурс, власником якого є сервіс-сервер [5] (див. рис. 3).

– Stateless (з англ. – без стану). Даний принцип вимагає, щоб кожного запиту не залежала від стану системи.

– Cacheable (з англ. – здатний до кешування). Дані, що надсилаються між сервером та клієнтом, можуть бути закешовані кожною із сторін.

– Uniform interface (з англ. – однотипний інтерфейс). Якщо застосувати до систем інженерний принцип спільності/одноманіття, то архітектура всього додатка стане простішою, а взаємодія стане прозорою та зрозумілою [8].

– Layered system (з англ. – багаторівнева система). Система має складатись з багаторівневих компонентів так, що кожен з них має доступ тільки до компонентів, що розташовані на сусідніх рівнях [5].

Говорячи в контексті мікросервісної архітектури, REST метод взаємодії між сервісами не завжди може бути корисним. Чим більше у системі мікросервісів тим важче їх інтегрувати одним з одним так, щоб мінімізувати кількість залежностей, що є проблемою тісної зв'язаності (див. рис. 4).

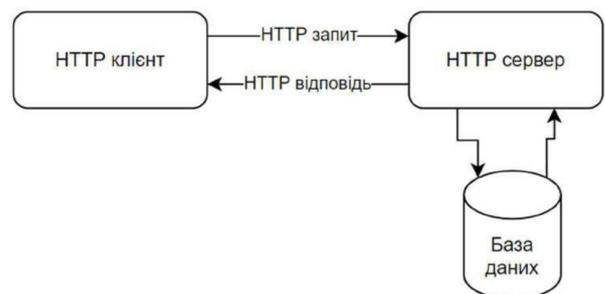


Рис. 3. Схема взаємодії клієнта і сервера з використанням RESTful підходу

Кількість максимальних залежностей мікросервісів один від одного пропорційна їх кількості.

кості у системі. Таким чином, можна обчислити кількість зв'язків у системі можна за допомогою наступної формули:

$$K\text{-ст}ь\ зв'язків = N * (N - 1) / 2,$$

де N – це кількість мікросервісів у систем.

Використовуючи дану формулу можна побудувати графік залежності максимальної кількості зв'язків у системі від кількості мікросервісів (див. рис. 5).

Ще однією проблемою є блокування – після надсилання HTTP запиту на мікросервіс-сервер, мікросервіс-клієнт стає недоступним до роботи допоки він не отримує відповідь на свій запит.

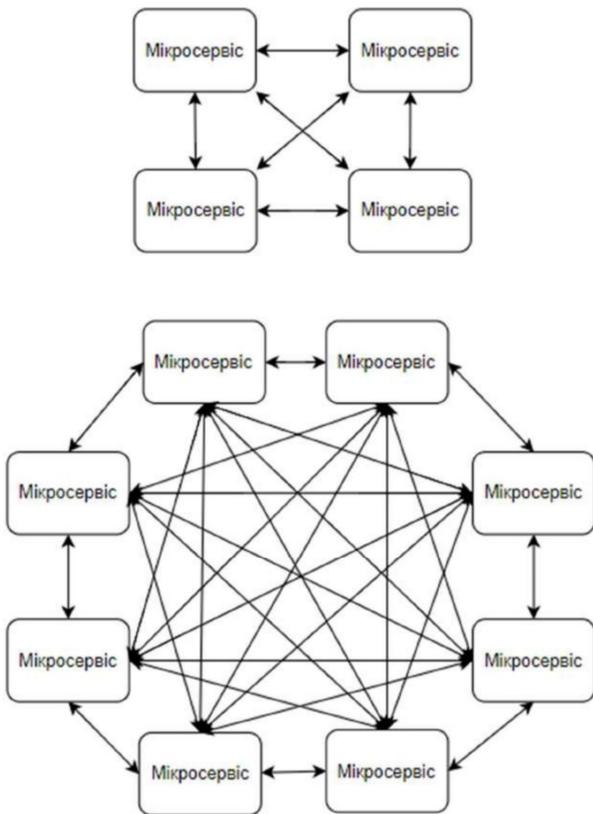


Рис. 4. Діаграма максимальної кількості зв'язків між мікросервісами при використанні REST підходу

Проблеми такого роду можуть бути подолані разом із використанням асинхронного методу взаємодії між мікросервісами, що базуються на Event-oriented (з англ. – подіє-орієнтований) архітектурному підході. Головною суттю даного підходу є наявність брокера повідомлень (від англ. message broker) у системі мікросервісів, що являє собою проміжне програмне забезпечення, яке полегшує обмін повідомленнями між різними системами або компонентами в рамках розподіленої архітектури [1]. Основні функції брокера повідомлень включають:

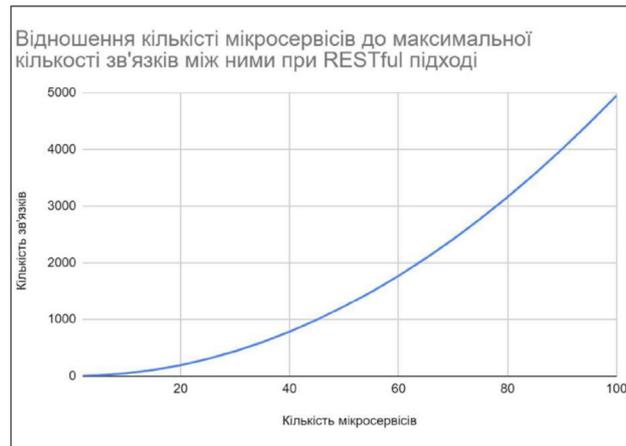


Рис. 5. Графік відношення кількості мікросервісів до максимальної кількості зв'язків між ними

- Маршрутизація повідомлень: Прийом повідомлень від відправників і пересилання їх до відповідних одержувачів.

- Асинхронність: Відправники можуть надсилати повідомлення без необхідності чекати на відповідь, що дозволяє компонентам працювати незалежно один від одного.

- Буферизація: Зберігання повідомлень до тих пір, поки одержувачі не будуть готові їх отримати.

- Перетворення повідомлень: Зміна формату повідомлень для сумісності між різними системами.

- Надійність і гарантія доставки: Забезпечення гарантованої доставки повідомлень навіть у випадку збою системи або мережі.

Прикладами брокерів повідомлень є RabbitMQ, Apache Kafka, ActiveMQ та Microsoft Azure Service Bus. Вони використовуються для побудови масштабованих і надійних систем, де компоненти можуть працювати незалежно і асинхронно обмінюватися даними [7].

Мікросервіс, що відправляє повідомлення брокеру, прийнято називати постачальниками. Будь-яка кількість постачальників має змогу відправляти повідомлення в певну чергу, так само і будь-яка кількість мікросервісів-підписників може вчитувати повідомлення з черги брокера [1]. Типова схема передачі даних за допомогою підписок і брокеру повідомлень зображена рис. 6.

Використання асинхронного способу до реалізації комунікації між мікросервісами має кілька переваг над синхронним підходом:

- Мала зв'язаність. Кожний мікросервіс залежить лише від брокера повідомлень. Саме тому кількість зв'язків у системі завжди буде дорівнювати кількості мікросервісів (див. рис. 7), а графік

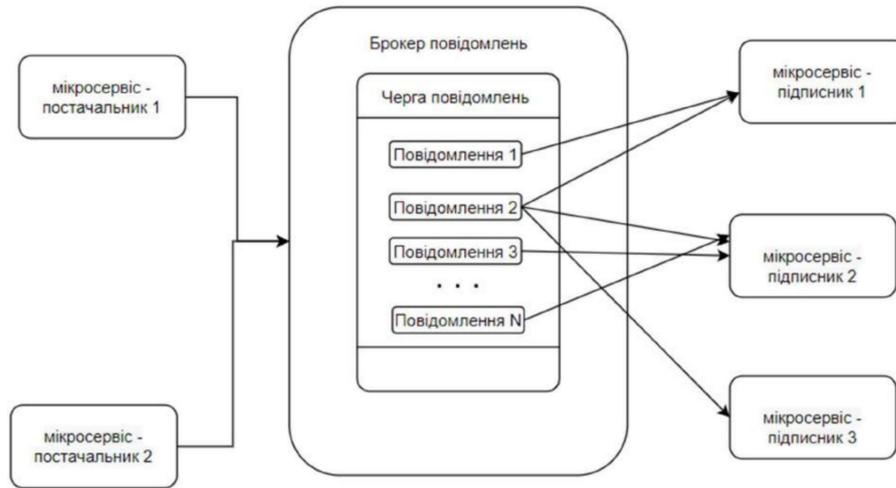


Рис. 6. Схема прикладу взаємодії мікросервісів із використанням брокера повідомлень

відношення кількості мікросервісів до зв'язків у системі матиме вигляд лінійної функції $f(x) = x$, де x – це кількість мікросервісів, $f(x)$ – кількість зв'язків (див. рис. 8).

– Відсутність блокувань. Мікросервіс-постачальник надіславши повідомлення не повинен чекати доки це повідомлення буде оброблене мікросервісом-підписником.

– Здатність до масштабування системи. З подієорієнтованим підходом дуже легко проводити впровадження нового мікросервісу в систему, адже йому не потрібно зав'язуватись на особливості всіх існуючих мікросервісів.

Однак, асинхронна комунікація мікросервісів також має свої недоліки:

– Неочевидність порядку виконання бізнес процесу. Мікросервіси комунікують через брокер повідомлень, а не напряму один з одним, тому стає важко прослідкувати послідовність роботи мікросервісів для певного бізнес-процесу.

– Кінцева узгодженість. З використанням асинхронного методу взаємодії можлива ситуація, коли стан системи є неузгоджений в контексті різних мікросервісів. Однак, коли всі події, необхідні для виконання певного бізнес процесу, будуть оброблені, то стан системи знову стане узгодженим.

– Складність у налагодженні. Оскільки порядок виконання бізнес процесу є неочевидний, то і виконувати процес налагодження складніше.

Для порівняння методів взаємодії між мікросервісами було розроблено 2 прототипи програмного продукту системи моніторингу роботи працівників. Продукт складається із клієнтського додатку для працівника та серверної частини. Основними функціональними вимогами для клієнта є:

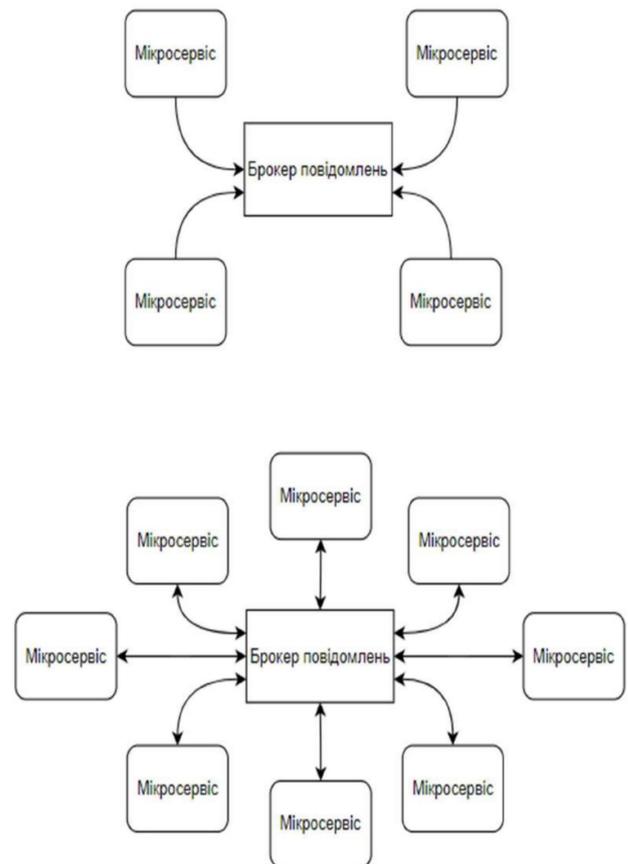


Рис. 7. Схема зв'язків між мікросервісами при подієорієнтованому підході

- авторизація працівника;
 - онлайн трекер робочого часу;
 - надсилання знімків екрану з робочого комп'ютера працівника на сервер;
 - відстеження бездіяльності працівника.
- Функціональні вимоги до серверної частини:
- збереження даних по обліку часу з клієнтів;

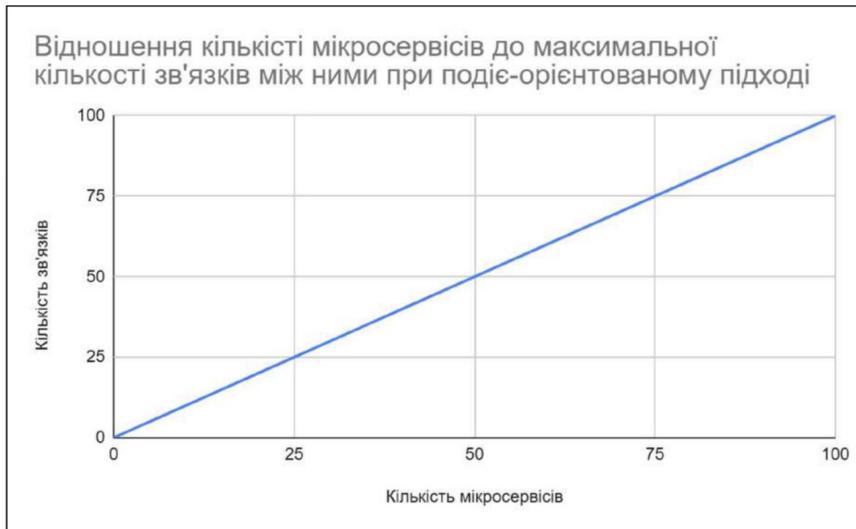


Рис. 8. Графік відношення кількості мікросервісів до максимальної кількості зв'язків у системі при подіє-орієнтованому підході

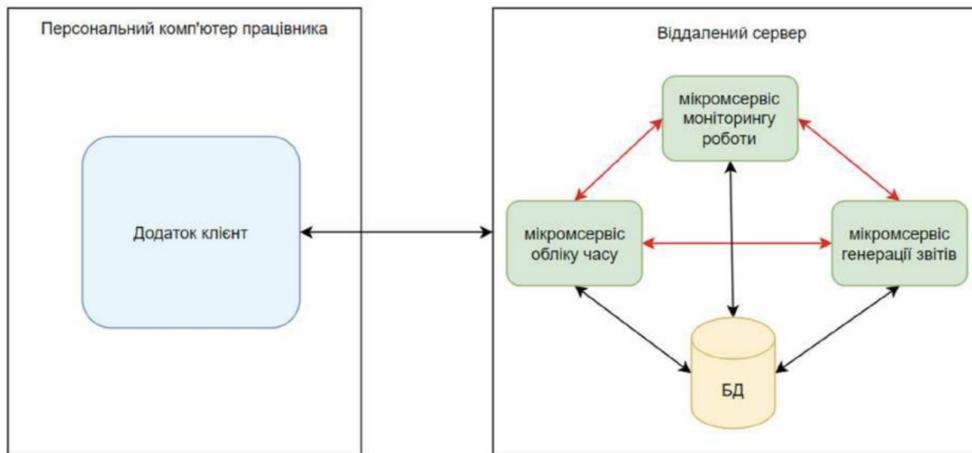


Рис. 9. Діаграма архітектури СМРП з використанням синхронного підходу зв'язку між мікросервісами

- збереження та перегляд знімків екрану;
- наявність веб інтерфейсу для адміністрування;
- генерація звітів про роботу працівників за різний період часу;
- додавання, редагування, та видалення працівників.

Для реалізації програмного продукту, було використано наступні програмні засоби:

1. База даних: PostgreSQL
2. Мова програмування: Java
3. Фреймворки: JavaFX (для клієнта), Spring Boot (для сервер)

4. Бібліотеки: Spring Data, Spring WEB, Spring AMQP (тільки для асинхронної взаємодії), Spring MVC, Spring Security, Thymeleaf

5. Брокер повідомлень: RabbitMQ (тільки для асинхронної взаємодії)

6. Середовища розробки: PgAdmin, IntelliJ IDEA

7. Інструменти для тестування: Apache JMeter, IntelliJ IDEA Profiler

Перший продукт складається із клієнтського додатку та серверної частини, що являє собою структуру мікросервісів, реалізовану за допомогою синхронної взаємодії між мікросервісами, та базу даних PostgreSQL (див. рис. 9). Комунікація між мікросервісами була реалізована за допомогою протоколу HTTP, що надає підтримку таких типів запитів як GET, POST, PUT, DELETE, і т.д., що забезпечують ресурсорієнтовану систему обміну повідомленнями [8]. Функції HTTP

можуть бути повністю використані в архітектурі REST, включаючи кешування, аутентифікацію та узгодження типу вмісту [4].

Другий продукт також містить із додаток-клієнт та серверної частини, що являє собою структуру мікросервісів, асинхронна взаємодія яких реалізована за допомогою брокера повідомлень RabbitMQ (див. рис. 10). Даний брокер використовує широкорозповсюдженого протокол передачі даних AMQP – Advanced Message Queue Protocol (з англ. розширений протокол черги повідомлень). Даний протокол виник у фінансовій галузі, як правило використовує надійний транспортний

протокол TCP/IP для передачі повідомлень [2]. AMQP забезпечує асинхронну комунікацію за допомогою публікації/підписки повідомлення. Його головна перевага – це функція зберігання та передачі даних, яка забезпечує надійність навіть після збоїв в роботі мережі [10].

Було проведено стрес-тестування сценарію по обробці події про початок роботи працівника серверної частини обох прототипів програмного продукту. Діаграми послідовності даного процесу в синхронній та асинхронній реалізації наведені на рис. 11 та на рис. 12 відповідно. Під час тестування серверний додаток був розгорнутий на

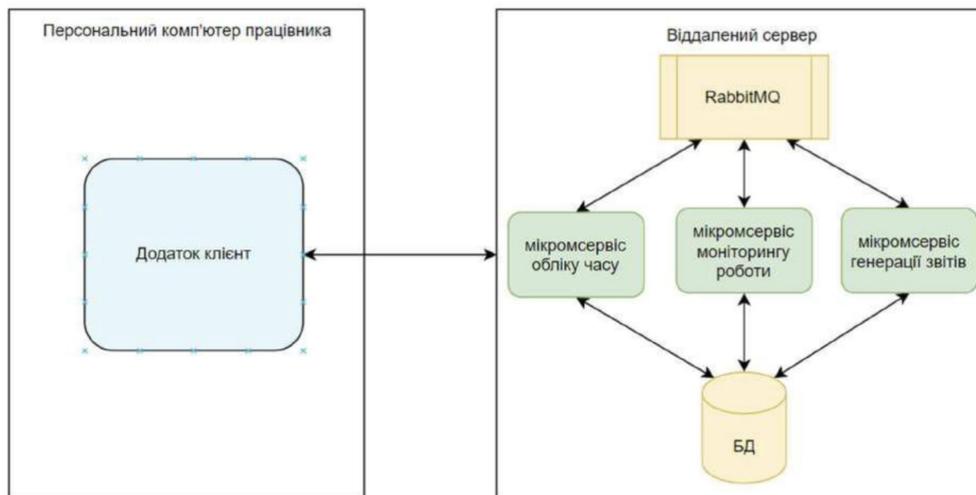


Рис. 10. Архітектура ПП із асинхронною зв'язками між мікросервісами

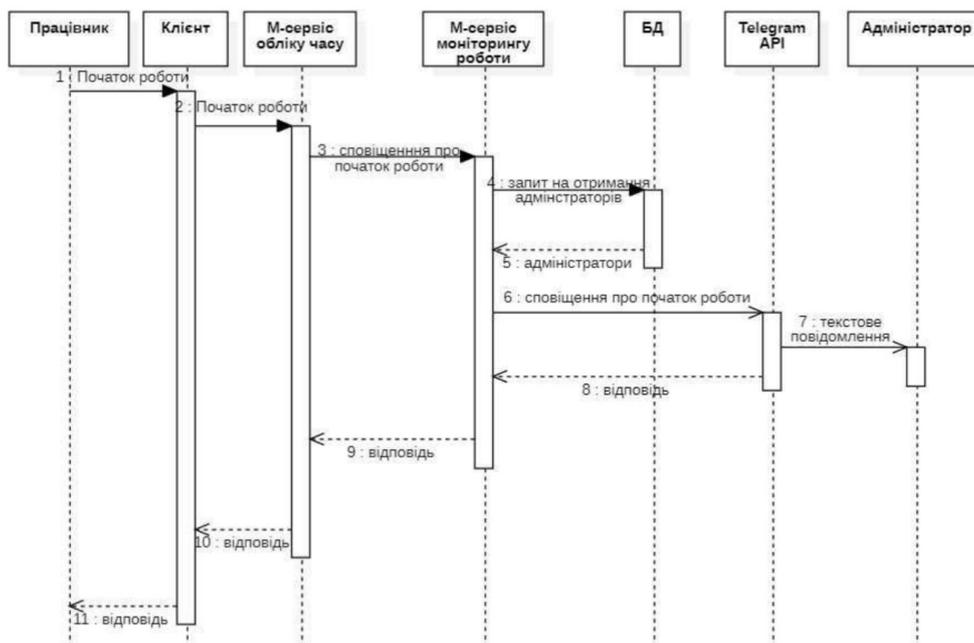


Рис. 11. Діаграма взаємодії процесу обробки початку роботи працівника із використанням синхронної взаємодії між мікросервісами

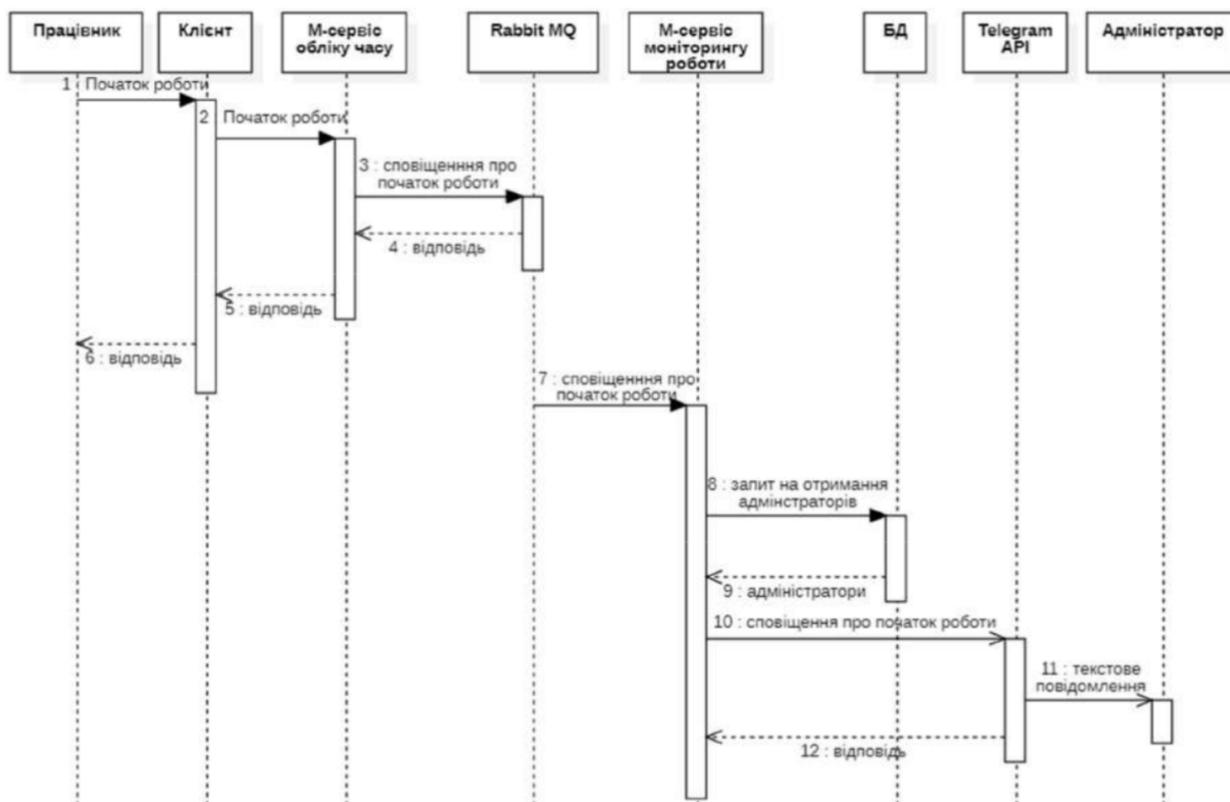


Рис. 12. Діаграма взаємодії процесу обробки початку роботи працівника із використанням асинхронної взаємодії між мікросервісами

системі із операційною системою Windows 10, центральним процесором Intel Core i5-8625U та кількістю ОЗП – 8ГБ.

Для автоматизації процесу тестування було обрано програмний засіб JMeter від компанії Apache – це безкоштовний додаток, що дозволяє створювати та виконувати тестові сценарії для проведення тестування навантаженої веб систем, симулюючи поведінку багатьох користувачів в один момент часу, а також отримувати статистику результатів тестування та зберігати її у вихідному CSV чи XML файлі.

Було написано автоматизовані тестові сценарії, для синхронного та асинхронного методу взаємодії. Кожен сценарій виконувався із симуляцією різної кількості користувачів системи: 10, 100, 500 та 1000. Під час виконання стрес-тестування було зібрано наступні метрики:

- Середня тривалість одного запиту.
- Загальний час обробки процесу для одного користувача.
- Використання оперативної пам’яті.

Отримані результати наведені та зображені графічно у відповідних таблицях 1–3 та діаграмах на рис. 13–15.

Таблиця 1

Середній час обробки одного запиту

| Тип взаємодії / к-сть користувачів | 10 | 100 | 500 | 1000 |
|------------------------------------|---------|----------|---------|---------|
| Синхронна взаємодія | 1131 мс | 3219 мс | 6584 мс | 8995 мс |
| Асинхронна взаємодія | 185 мс | 436.8 мс | 1651 мс | 2134 мс |

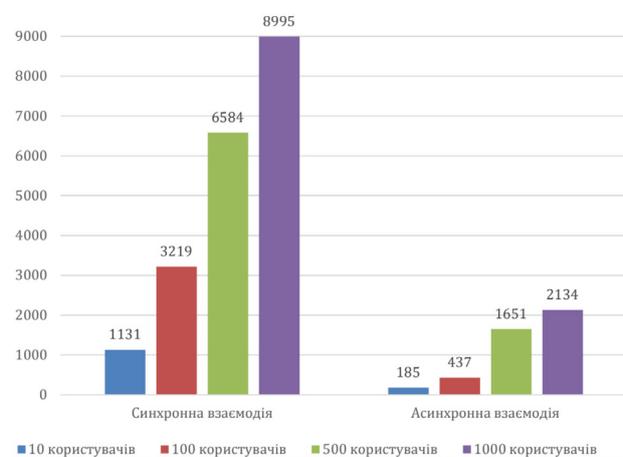


Рис. 13. Діаграма середньої тривалості запиту при синхронній та асинхронній взаємодії. Дані представлені у мілісекундах

Таблиця 2

Результати використання ОЗП

| Тип взаємодії / к-сть користувачів | 10 | 100 | 500 | 1000 |
|------------------------------------|--------|--------|--------|--------|
| Синхронна взаємодія | 145 МБ | 197 МБ | 248 МБ | 335 МБ |
| Асинхронна взаємодія | 165 МБ | 174 МБ | 187 МБ | 201 МБ |

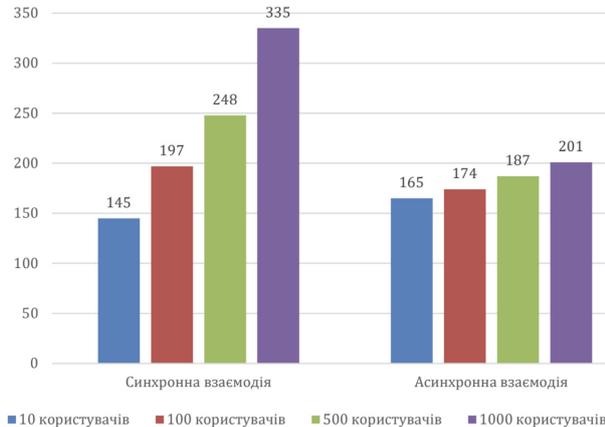


Рис. 14. Діаграма використання ОЗП при синхронній та асинхронній взаємодії. Дані представлені у мегабайтах

Таблиця 3

Загальний час обробки всіх запитів

| Тип взаємодії / к-сть користувачів | 10 | 100 | 500 | 1000 |
|------------------------------------|---------|---------|----------|----------|
| Синхронна взаємодія | 1.387 с | 18.74 с | 64.952 с | 117.43 с |
| Асинхронна взаємодія | 1.106 с | 16.84 с | 122.95 с | 258.9 с |

Проаналізувавши отримані дані тестування, бачимо, що розроблений ПП на основі асинхронної взаємодії споживає менше системних ресурсів, однак програє у швидкодії аналогічному ПП, що використовує синхронну взаємодію, коли існує понад 100 користувачів, що одночасно взаємодіють із програмним продуктом.

Висновки. В роботі досліджено використання мікросервісного підходу в архітектурі програмного забезпечення, проаналізовано типи комунікацій між мікросервісам, визначено переваги та недоліки синхронного та асинхронного методів взаємодії мікросервісів.

Розроблено програмні продукти системи моніторингу роботи працівників підприємства із вико-

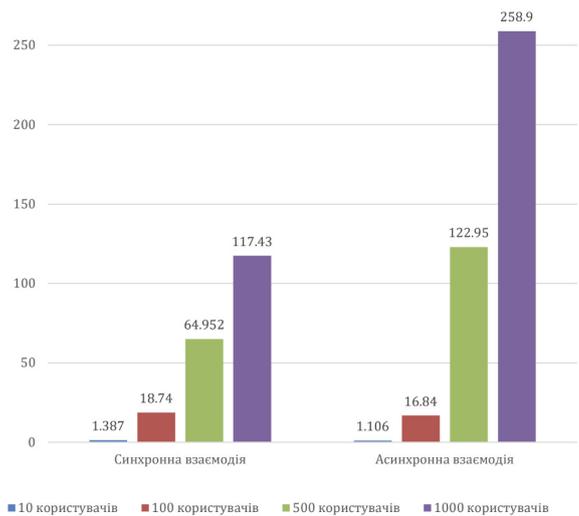


Рис. 15. Діаграма тривалості обробки процесу для всіх користувачів при синхронній та асинхронній взаємодії. Дані представлені у секундах

ристанням синхронного та асинхронного методів комунікації між мікросервісами. Проведено стрес-тестування двох розроблених програмних продуктів за допомогою Apache JMeter та IntelliJ IDEA Profiler.

На основі отриманих результатів, можна зробити висновок, що асинхронний підхід до побудови програмного забезпечення матиме перевагу над синхронним, коли основною вимогою до ПЗ є обробка великої кількості однотипних процесів із мінімальною затратою системних ресурсів. Однак, якщо пріоритетом для програмного продукту є його швидкодія, то доцільно буде використовувати синхронний метод взаємодії між мікросервісами.

Таким чином, для системи моніторингу роботи працівників підприємства краще буде використати асинхронний підхід до зв'язку між мікросервісами, оскільки підтримка великої кількості працівників має важливе значення та є більш вагомим, ніж швидкодія виконання бізнес процесу. Також перевагою асинхронного підходу в даному випадку є менше споживання системних ресурсів, що дозволяє зменшити витрати коштів на оренду віртуального сервера чи хмарного середовища, які будуть використовуватися для розгортання програмного продукту.

Список літератури:

1. Bellemare A. Building Event-Driven Microservices: Leveraging Organizational Data at Scale 1st Edition. Sebastopol: O'Reilly Media, Inc., 2020. 322 с.

2. Videla A., Williams J. RabbitMQ in Action. Нью-Йорк: Manning Publications Co., 2012. 558 с.
3. Thomas S. HTTP Essentials: Protocols for Secure, Scaleable Web Sites. Лондон: Wiley, 2001. 336 с.
4. Pollard B. HTTP/2 in Action. Нью-Йорк: Manning Publications Co., 2019. 416 с.
5. Webber J., Parastatidis S., Robinson I. REST in Practice. Себастопол: O'Reilly Media, Inc., 2010. 446 с.
6. Carnell J., Sanchez I. Spring Microservices in Action. Нью-Йорк: Manning Publications Co., 2021. 448 с.
7. AMQP 0-9-1 Model Explained. URL: <https://www.rabbitmq.com/tutorials/amqp-concepts.html>. (дата звернення: 18.06.2024).
8. REST Architectural Constraints. URL: <https://restfulapi.net/rest-architectural-constraints/>. (дата звернення: 21.06.2024).
9. Newman S. Building Microservices: Designing Fine-Grained Systems. Себастопол: O'Reilly Media, Inc., 2021. 500 с.
10. Spring AMQP. URL: <https://spring.io/projects/spring-amqp>. (дата звернення: 29.06.2024).

Tarnovetska O.Yu., Osadchuk R.R. RESEARCH OF INTERACTION METHODS BETWEEN SERVICES IN MICROSERVICE SOFTWARE ARCHITECTURE

The main objective of this article was to study the existing methods of interaction between the components of a software product created using microservices architecture. The authors conducted a detailed analysis of various protocols used for microservices interaction. During the research, the general structure of these protocols, the main characteristics of their working algorithms, data transmission processes, and methods of application in the context of microservices architecture were determined. Special attention was given to protocols such as HTTP/REST and AMQP, which provide different levels of performance, reliability, and ease of use.

To demonstrate the capabilities of microservices architecture and various methods of integration between services, software was developed for monitoring the working hours of subordinates in an enterprise. This software includes a set of microservices, each performing a specific task related to monitoring, collecting, and analyzing data on employees' working hours.

One of the key stages of the research was to determine the most optimal interaction protocol between the components of the software product. For this purpose, a series of test cases was created to model different usage scenarios of the software in a real enterprise environment. Based on these test cases, stress testing was conducted, which allowed evaluating the behavior of the software prototypes under different loads. This included simulating high loads, checking the stability of operation during prolonged runs, and assessing the system's fault tolerance.

The data obtained from the testing was thoroughly analyzed, and the identified patterns were substantiated. Based on the analysis, it was determined which protocols and interaction methods ensure the highest performance, reliability, and stability of the software in real-world use conditions. These results formed the basis for formulating recommendations for choosing methods of integrating microservices during the planning and development of a new software product.

Key words: *microservice, protocol, system, interaction, event, data transmission.*

Khambir V.R.

CapitalOne, 1680 Capital One Dr, McLean, VA

ANALYZING PROJECT MANAGEMENT METHODS IN SOFTWARE DEVELOPMENT

Aim. Software project success primarily depends on software project management practices, which ensure timely delivery, budget constraints, and quality goals. With the ever-changing nature of the software industry, project management must always be revised, improved, and re-evaluated in light of the changing landscape of the software industry.

Methodology. This research study examines project management approaches by conducting a literature review and comparing the state-of-the-art process models currently in use in the software industry. The processes compared in this research are waterfall models, agile (Scrum, Kanban), and hybrid approaches (Scrumban, Lean/Agile). The research study is designed to assess the strengths and weaknesses of the methods from multiple viewpoints of project management. The research study also investigates factors affecting the success of these methods, such as organizational culture, leadership frameworks, and the decision-making process. The modern trends in software project management are also considered in this research, along with modern software application paradigms like DevOps, cloud computing, containerization, artificial intelligence, and machine learning integration.

Results. The modern development trends in the software industry also require improved management practices and theories to handle the newness of these projects. The research study also proposes a model that helps the project managers identify a suitable process model as per the project needs. The proposed model also considers factors that affect the successful execution of a project, like team dynamics or organizational environments. The research study also includes modern project management practices like DevOps, cloud computing, artificial intelligence, machine learning integration, and containerization in comparison with classic management paradigms like waterfall, agile, and hybrid methods.

Scientific Novelty. The research study suggests organizational guidelines on the basis of this comparison between classic and modern methods. The guidelines help identify the best combination of management practices for a tailored approach to suitable methods for a particular software development project.

Conclusion. The identified methods of project management increase the success criteria for a software project and help to optimize the development process, which returns the satisfaction of market demands and delivers a high-quality software solution.

Key words: Agile, DevOps, Hybrid-Agile, Project Management, Scrumban.

Formulation of the problem. Due to the technological enhancement the software development has become an integral part of many sectors like, entertainment, finance and e-commerce among others. The need of project management strategies raises due to increasing complexity of software applications. The quality parameters as specification, cost and schedule are sensitive and requires ensured software development project management. To enhance productivity, re-distribute resources, improve communication and increase customer satisfaction, effective project management methodologies have been used as tools. Due to the dynamically changing nature of software, it is also important to evaluate the effectiveness and relevance of these practices.

With the arrival of emerging technologies, the software development sector is characterized by its dynamism, while old methodologies die off quickly.

The speedy change rise the challenges for project managers who must comply with evolving constraints and expectations. At the same time working on complex client requirements using heterogeneous teams which can be managed either through matrix or non-hierarchical structures. The market value affected if you do not plan out your activities efficiently from the beginning, which cause delays or cost overruns.

Conventionally, the structured approaches such as “Waterfall” model were often desired for development of software projects due to its linear sequential approach. With the evolving requirement conventional approaches had limitations. Agile methodologies became popular for evolving systems due to flexible nature towards evolution. These approaches also support collaboration between developers and other stakeholders throughout an iterative process. Agile approaches have proven particularly useful

in addressing some unique issues associated with software development projects, such as adaptability to changes in user constraints, promoting teamwork through face-to-face conversations, and providing deliverable modules in stages over short intervals. Nonetheless, successful implementation of agile concepts necessitates a total shift in organisational attitudes towards work processes, which can be challenging, particularly if workers have already become accustomed to regular operations.

Objectives of the article. Other project management frameworks, in addition to agile methodologies, can be utilized depending on the situation. To address the peculiarities of software development projects, hybrid models like Scrumban and Lean/Agile hybrids were developed. Additionally, the rise of distributed teams and remote collaboration has necessitated the development of methods and tools that facilitate cross-border communication, coordination, and knowledge sharing. Different strategies are polished today however they ought to be chosen after cautious thought of the specific undertaking's necessities, group structure and corporate culture. Methodologies for effective project management can ultimately result in the successful delivery of software projects by improving productivity, resource allocation, communication, and customer satisfaction.

However, the software development industry is not static, so project management methods must constantly change to keep up with new technologies and trends. New paradigms like DevOps, which emphasizes bringing software development and operations together, as well as the rise of cloud computing and containerization, have presented project management with new challenges and opportunities. In addition, they have to be incorporated into project management strategies because of the increased emphasis on user experience, security, and compliance requirements, among other things. Organizations must constantly evaluate and modify their project management practices in order to remain relevant and efficient in this environment that is rapidly changing. Organizations can optimize project delivery by utilizing the most recent methodologies, tools, and techniques, thereby improving software quality overall, by establishing a culture of continuous learning and improvement.

Software Development Projects' Complexities. Navigating the complexities of software development projects necessitates efficient project management strategies [1]. It is possible for businesses to achieve levels of productivity they had never imagined possible if they employ the appropriate strategies and continuously adjust to the prevalent trends in

the industry. This will prompt better allotment of assets higher consumer loyalty further developed correspondences among different advantages. The purpose of this study is to learn about various project management approaches, including their advantages and disadvantages, as well as their suitability for various software development contexts. This concentrate accordingly tries to draw best practices, basic achievement factors (CSFs) as well as distinguish imaginative methodologies for directing associations in picking project the board techniques that are generally suitable.

An analysis of the latest research and publications. This research topic's literature review includes a wide range of studies on project management in software development environments from academic and business communities. According to [2], numerous authors have investigated a variety of approaches, frameworks, or models with the intention of increasing the efficiency or effectiveness of delivering such programs. As a result, this section provides an overview of previous research in this area.

Main Research Material

Methods Used by Traditional Project Management. The Waterfall model, one of the earliest and most well-known methodologies, has been extensively studied and criticized [3]. The method is linear in nature, but researchers report that it is inflexible. The report's causes of inflexibility are its inability to adapt to changing requirements

Agile Project Management

Modern-era methods like Agile family process models like Scrum, Kanban, and Extreme Programming (XP) were deployed to overcome the shortcomings of the classic methods. The main drawbacks reported for the classic methods were huge volumes of documentation, change adaptation methods, and delayed client feedback [4]. The agile methods were characterized by change management models, improved client communication, daily or weak client feedback, and delivering the projects in small, manageable iterations.

Hybrid or Customized Methods

Different hybrid methodologies that combine various frameworks have emerged to address the organization's need for greater flexibility and customization in project management. For example, Scrumban [5] combines elements of Kanban and Scrum. Lean/Agile hybrids on the other hand borrow from lean principles as well as agile methodologies like XP and Scrum which are mostly used in software development projects but tend to be more or less prescriptive depending on the situation of the project.

The potential advantages and drawbacks of these methodologies were investigated by this study [6].

Project management tools and techniques.

The modern software project methods also gain popularity due to the rapidly growing support with tools and software's which facilitates the software development on each phase and cut short the total development time of a project. A reasonable share of research was focused on concepts and methods like team communication, project success factors, change management, configuration management, and continuous development methods [7].

Distributed and Remote Project Management

The de-centralized teams for software projects open the remote working, work from home or distributed software development. There were many portions of research dedicated to investigating domains like distributed project management, lean development, geographic diversity management, team communication for distributed projects, and knowledge sharing and management for distributed teams.

Emerging Trends and Future Directions

The new trends have also emerged in software project management, like DevOps, which integrates cloud services with software project management activities. There is also a need to investigate challenges like cloud data security, data engineering, cloud service availability, and user experience (UX) adjustments with these modern process management methods critical success factors and proposing a framework or guidelines for selecting and implementing the most suitable approaches based on project characteristics and organizational requirements.

Setting of Objectives. The main aim of this research is to evaluate the different software development methodologies used in project management. This will involve looking at traditional models such as Waterfall and modern agile frameworks like Scrum, Kanban, XP among others.

The hybrid models integrate different methods, e.g., Scrumban and Lean/Agile hybrids. The choice of these methods depends on the project requirements, budget, and team experience. The primary goal of these methods is to identify the major factors that contribute to a successful project management solution. Team management, project complexity, organizational culture, change management, and user characteristics also need to be considered for a successful project management solution. These parameters will help the organization and project managers make informed decisions with realistic goals set for a project, which in turn increases the probability of project success.

Formulation of the goals of the article. The current research findings show many viewpoints under several themes that were considered during the data analysis of this study. The findings of this study provide assessment criteria for a project management method and guidelines for choosing an integrated solution for a particular software development project.

Evaluation of Project Management Methodologies. Traditional Methodologies

The traditional methods are ideal because of their stable requirements and documentation support for each step of the software development activities. The classic methods are change-reluctant, sequential in nature, and have limited client feedback options. These bottlenecks make them inappropriate for modern software development projects.

Agile Methodologies (e.g., Scrum, Kanban, XP). Strengths: Flexibility; iterative process; constant stakeholder involvement; adaptability to alterations in needs. Limitations: Possibility of scope creep; difficulties encountered when managing large projects; and reliance on experienced and highly skilled team members. Applicability: They are widely used in different software development scenarios with high levels of uncertainty and high customer involvement.

Hybrid Methodologies. Blends elements from different approaches and tailors them accordingly to the specific needs of a given project thus fostering continual improvement. Difficulties when implementing it, inconsistencies that may arise, therefore leading to cultural barriers within an organization. Designed for any organization that desires to overcome their unique challenges by coming up with a tailor made solution for them.

Outline of the main research material

Successful adoption of project management methodologies requires strong leadership commitment, and culture change which encourages collaboration, continuous learning, adaptability etc. Team Expertise and Competencies. Well informed team members who are highly skilled and experienced coupled with effective communication skills as well as collective knowledge about project management practices must be in place before one can talk of successful implementation.

Continuous engagement with various stakeholders like customers, users across functions help achieve desired project outcome in line with expectations. The size, complexity, team distribution and the nature of requirements (stable or rapidly changing) should be some factored into when choosing a project management methodology.

Table 1

Project Management Techniques

| Category | Study | Authors | Key Findings | Limitations / Challenges |
|---|---------------------------------------|----------------------------------|--|--|
| Traditional Project Management | The Waterfall Model | Royce (1970) [8] | Introduced a structured, sequential approach to software development. | Inflexibility and poor handling of changing requirements. |
| | | Benington (1983) [9] | Early critique and evolution of Waterfall practices in real-world applications. | Similar limitations as Royce; noted practical issues. |
| | Critique of Waterfall Model | Stoica et al. (2016) [10] | Highlighted Waterfall's limitations in dynamic and complex environments. | Suggested alternatives but noted lack of empirical evidence in some areas. |
| Agile Project Management | Agile Manifesto | Highsmith & Cockburn (2001) [11] | Introduced principles focusing on iterative development, collaboration, and flexibility. | Broad principles with varying interpretations in practice. |
| | Agile Software Development | Fowler & Highsmith (2001) [12] | Emphasized adaptive planning, evolutionary development, and early delivery. | Theoretical basis with limited empirical evidence. |
| | Scrum | Schwaber & Beedle (2002) [13] | Popularized Scrum framework for managing agile projects; iterative and incremental. | Implementation challenges and need for strong Scrum master roles. |
| Hybrid and Tailored Methodologies | Scrumban | Reddy (2015) [14] | Combined Scrum's structure with Kanban's flexibility; aimed at continuous improvement. | Complexity in implementation and balancing both frameworks. |
| | Lean/Agile Hybrid | Rodríguez et al. (2012) [15] | Integration of Lean and Agile principles for efficiency and adaptability. | Challenges in cultural shift and maintaining balance. |
| Project Management Tools and Techniques | Impact of PM Tools on Project Success | Azanha et al. (2017) [16] | Empirical study showing positive effects of PM tools on project management outcomes. | Focus on tools rather than methodology. |
| | Modern PM Software and Tools | Kerzner (2017) [17] | Comprehensive overview of modern project management software and tools. | Need for better integration and customization features. |
| Distributed and Remote Project Management | Challenges of Distributed Teams | Herbsleb & Mockus (2003) [18] | Addressed key challenges in managing distributed software teams, such as communication and coordination. | Early study with evolving challenges due to technological advancements. |

Source: author's own development

Continuous Improvement and Adaptation. Long-term success is rooted in regular retrospectives, lessons learned as well as adapting/refining the PM practices based on feedback-changing times.

Emerging Trends and Innovative Approaches. DevOps and Continuous Integration/Continuous Deployment (CI/CD):

Integrating software development with operations through DevOps practices as well as automated CI/CD pipelines can facilitate collaboration, hasten delivery, and enhance overall quality.

Containerization and Cloud Computing:

Docker, a containerization technology, and cloud computing platforms like AWS and Azure are changing software development which necessitates project management adaptations.

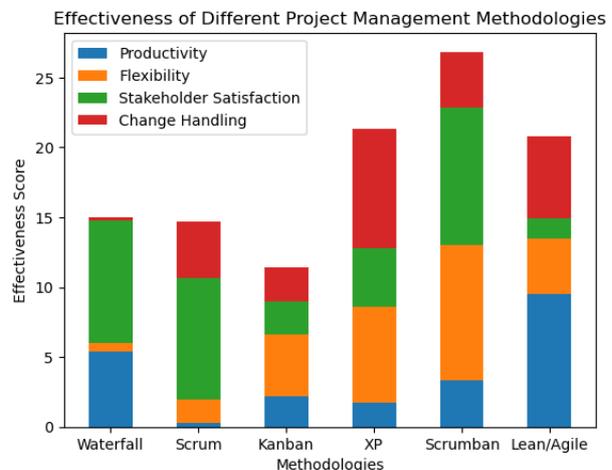


Fig. 1. Effectiveness Score of Methodologies

User Experience (UX) and Design Thinking:

The UX is a better insight for taking clients on board with software projects. It also incorporates a design thinking methodology that outperforms user-centric solutions and enhances customer satisfaction as well.

Agile at Scale and Distributed Agile:

Frameworks such as Scaled Agile Framework (SAFe) or Disciplined Agile Delivery (DAD) are the best choices for distributed team management, team communication, and cloud services integration with the software development cycles.

Artificial Intelligence (AI) and Machine Learning (ML):

Integration of AI and ML technologies with the software development processes will enhance intelligent decision-making, automated resource management, code repository management, configuration management, automated task distribution, and work-load management.

The research study investigates the parameters effecting software project management success rates and provides a comprehensive discussion about the strengths and weaknesses of the process models under study. Additionally, the study also identified the most important success factors. The study also investigates the emerging trends in software project management that are used to optimize software project management practices.

Conclusions from this study and further prospects. Software development is the most evolving and rapidly growing industry on the globe so far. There are many contributing factors as well as challenges to maintaining this tremendous growth. One way to maintain the growth and enhance the potential of this industry is through improved software project management. Accurate and optimized software project management will ensure successful delivery within time and budget constraints.

This research study provides a detailed analysis and insights for the classic software project management methods with novel and state-of-the-art methods for software project management. The study reveals that there is no single solution to fit-for-all software project management problems. The study also identifies that there is a need for integrated solutions from classic methods as well as modern methods to address the changes and requirements of new-era software development. The organizations should adopt a customized solution for their projects, keeping in mind success factors, user characteristics, and market requirements. The project leaders may combine the best elements of all methods to design an optimized software development process. The primary goal of a customized process model is to address the specific challenges faced by the organization. The process design must consider the organizational culture, team experience and expertise, and communication requirements. The stakeholder collaboration is a must-consider success criteria for all small- to large-scale software project management processes. Continuous development, continuous integration, and continuous adoption are the keys to success in modern software development.

Novel trends in software development like DevOps, containerization, cloud computing, and AI/ML integration also play an important role in upscaling the development process, adding business value, improving team management, team communication, and error-free, automated decision-making. Informed decision-making also supports robust and ready-to-welcome changes to processes, projects, and products. This research offers a baseline understanding of these key concepts and lists the important parameters for the process and project success. The research also provides a model to design a customized process model for a software project management context.

Bibliography:

1. Gilb T. 12.3 Project Failure Prevention: 10 Principles for Project Control. *INCOSE International Symposium*. 2005. Vol. 15, no. 1. P. 1743–1760. URL: <https://doi.org/10.1002/j.2334-5837.2005.tb00786.x> (date of access: 17.06.2024).
2. Nesterov V. F. Understanding the influence of data visualization techniques on decision-making processes in business. *Taurida Scientific Herald. Series: Technical Sciences*. 2024. № (1). P. 60-70. URL: <https://doi.org/10.32782/tnv-tech.2024.1.7> (date of access: 17.06.2024).
3. Fotariya M. A., Mandge M. O. Systematic Review of Agile Methodologies for Software Development. *International Journal for Research in Applied Science and Engineering Technology*. 2022. Vol. 10, no. 6. P. 1771–1774. URL: <https://doi.org/10.22214/ijraset.2022.44143> (date of access: 17.06.2024).
4. Agile development in the cloud computing environment: A systematic review / M. Younas et al. *Information and Software Technology*. 2018. Vol. 103. P. 142–158. URL: <https://doi.org/10.1016/j.infsof.2018.06.014> (date of access: 17.06.2024).
5. Alqudah M., Razali R. An Empirical Study of Scrumban Formation based on the Selection of Scrum and Kanban Practices. *International Journal on Advanced Science, Engineering and Information Technology*. 2018. Vol. 8, no. 6. P. 2315. URL: <https://doi.org/10.18517/ijaseit.8.6.6566> (date of access: 17.06.2024).
6. Comparative Analysis of Empirical Research on Agile Software Development Approaches / T. Sarkar et al. *2024 11th International Conference on Reliability, Infocom Technologies and Optimization (Trends*

and Future Directions) (ICRITO), Noida, India, 14–15 March 2024. 2024. URL: <https://doi.org/10.1109/icrito61523.2024.10522134> (date of access: 17.06.2024).

7. Майбутнє DevOps: тенденції та прогнози на 2023 рік. *DOU Community*. 2023. URL: <https://dou.ua/forums/topic/42361/> (дата звернення: 17.06.2024).

8. Royce W. W. Managing the development of large software systems. *Proc. Westcon*, 1970. Vol. 314. URL: <https://www.praxisframework.org/files/royce1970.pdf> (date of access: 17.06.2024).

9. Benington H. D. Production of Large Computer Programs. *IEEE Annals of the History of Computing*. 1983. Vol. 5, no. 4. P. 350–361. URL: <https://doi.org/10.1109/mahc.1983.10102> (date of access: 17.06.2024).

10. Analyzing Agile Development – from Waterfall Style to Scrumban / M. Stoica et al. *Informatica Economica*. 2016. Vol. 20, no. 4/2016. P. 5–14. URL: <https://doi.org/10.12948/issn14531305/20.4.2016.01> (date of access: 17.06.2024).

11. Cockburn A., Highsmith J. Agile software development, the people factor. *Computer*. 2001. Vol. 34, no. 11. P. 131–133. URL: <https://doi.org/10.1109/2.963450> (date of access: 17.06.2024).

12. The Agile Manifesto. Agile Alliance. - References - Scientific Research Publishing / K. Beck, et al. *SCIRP Open Access*. 2001. URL: <https://www.scirp.org/reference/referencespapers?referenceid=1360087> (date of access: 17.06.2024).

13. Schwaber K. Agile project management with Scrum. Microsoft press, 2004. URL: <https://www.agileleanhouse.com/lib/lib/People/KenSchwaber/Agile%20Project%20Management%20With%20Scrum%20-www.itworkss.com.pdf> (date of access: 17.06.2024).

14. Reddy A. The Scrumban [R]Evolution: Getting the Most Out of Agile, Scrum, and Lean Kanban. Addison-Wesley Professional, 2015. URL: <https://www.oreilly.com/library/view/the-scrumban-revolution/9780134077543/>. ISBN 978-0-13-407754-3.

15. Rodríguez P., Markkula J., Oivo M., Garbajosa J. Analyzing the Drivers of the Combination of Lean and Agile in Software Development Companies. In: Dieste, O., Jedlitschka, A., Juristo, N. (eds) *Product-Focused Software Process Improvement. PROFES 2012. Lecture Notes in Computer Science*, vol 7343. Springer, Berlin, Heidelberg. URL: https://doi.org/10.1007/978-3-642-31063-8_12 (date of access: 17.06.2024).

16. Agile project management with Scrum / A. Azanha et al. *International Journal of Managing Projects in Business*. 2017. Vol. 10, no. 1. P. 121–142. URL: <https://doi.org/10.1108/ijmpb-06-2016-0054> (date of access: 17.06.2024).

17. Saladis F. P., Kerzner H. Project Management Workbook and PMP / CAPM Exam Study Guide, 12th ed. 2017. 544 URL: [ook+and+PMP+%2F+CAPM+Exam+Study+Guide%2C+12th+Edition-p-9781119169109](https://www.amazon.com/Project-Management-Workbook-PMP-CAPM-Exam-Study-Guide-12th-Edition-p-9781119169109). – ISBN 978-1-119-16910-9.

18. J. D. Herbsleb and A. Mockus, An empirical study of speed and communication in globally distributed software development. *IEEE Transactions on software engineering*, 2003. Vol. 29, no. 6, 481–494.

Хамбір В.Р. АНАЛІЗ МЕТОДІВ УПРАВЛІННЯ ПРОЄКТАМИ В РОЗРОБЦІ ПРОГРАМНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ

Мета. Успіх програмного проєкту в першу чергу залежить від методів управління програмними проєктами, які забезпечують своєчасну доставку, дотримання бюджетних обмежень і досягнення цілей якості. Враховуючи мінливий характер індустрії програмного забезпечення, управління проєктами повинно постійно переглядатися, вдосконалюватися та переоцінюватися у світлі мінливого ландшафту індустрії програмного забезпечення. **Методологія.** Це дослідження вивчає підходи до управління проєктами шляхом проведення огляду літератури та порівняння найсучасніших моделей процесів, які наразі використовуються в індустрії програмного забезпечення. У цьому дослідженні порівнюються водоспадні моделі, гнучкі (*Scrum*, *Kanban*) та гібридні підходи (*Scrumban*, *Lean/Agile*). Мета дослідження - оцінити сильні та слабкі сторони методів з різних точок зору управління проєктами. Дослідження також вивчає фактори, що впливають на успіх цих методів, такі як організаційна культура, структура лідерства та процес прийняття рішень. У цьому дослідженні також розглядаються сучасні тенденції в управлінні програмними проєктами, а також сучасні парадигми застосування програмного забезпечення, такі як *DevOps*, хмарні обчислення, контейнеризація, штучний інтелект та інтеграція машинного навчання.

Результати. Сучасні тенденції розвитку індустрії програмного забезпечення також вимагають вдосконалення управлінських практик і теорій, щоб впоратися з новизною цих проєктів. У дослідженні також запропоновано модель, яка допомагає менеджерам проєктів визначити відповідну модель процесу відповідно до потреб проєкту. Запропонована модель також враховує фактори, які впливають на успішне виконання проєкту, такі як динаміка команди або організаційне середовище. Дослідження також включає сучасні практики управління проєктами, такі як *DevOps*, хмарні обчислення, штучний інтелект, інтеграція машинного навчання та контейнеризація, у порівнянні з класичними парадигмами управління, такими як водоспад, гнучкі та гібридні методи. **Наукова новизна.** Дослідження пропонує організаційні рекомендації на основі цього порівняння між класичними та сучасними методами. Рекомендації допомагають визначити найкращу комбінацію управлінських практик для індивідуального підходу до підходящих методів для конкретного проєкту з розробки програмного забезпечення.

Висновок. Визначені методи управління проєктами підвищують критерії успіху програмного проєкту та допомагають оптимізувати процес розробки, що повертає задоволення вимог ринку та забезпечує високоякісне програмне рішення.

Ключові слова: *Agile*, *DevOps*, *Hybrid-Agile*, управління проєктами, *Scrumban*.

Шкарупило В.В.

Національний університет біоресурсів і природокористування України,
Інститут проблем моделювання в енергетиці ім. Г.Є. Пухова НАН України

Душеба В.В.

Інститут проблем моделювання в енергетиці ім. Г.Є. Пухова НАН України

Зайко Т.А.

Національний університет «Запорізька політехніка»

Шкарупило В.В.

Національний університет «Запорізька політехніка»

Скруський С.Ю.

Національний університет «Запорізька політехніка»

ІНДУКТИВНИЙ ПІДХІД ДО ПОБУДОВИ ФОРМАЛІЗОВАНИХ ПОДАНЬ ПРОГРАМНО-АЛГОРИТМІЧНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ПРИ ПРОЄКТУВАННІ

У наш час рівень складності актуальних комп'ютерних систем, на основі яких реалізуються виробничі і невиробничі предметно-орієнтовані сценарії, є зростаючим. Це твердження справедливе і по відношенню до систем критичного призначення – систем, збої і відмови у роботі яких можуть призвести до небажаних наслідків значного масштабу. Передбачуваність роботи таких систем досягається, у тому числі, за рахунок комплексного застосування методів і засобів контролю подань розроблюваного програмно-алгоритмічного забезпечення при проєктуванні. Зазначені подання, у загальному випадку, є неформалізованими, що, серед іншого, ускладнює процес їх контролю за показником несуперечливості програмно-алгоритмічного забезпечення.

У якості методу контролю охоплено поширений формальний метод перевірки на моделі TLC (TLA Checker), а у якості супутніх засобів – темпоральну логіку дій TLA (Temporal Logic of Actions) Леслі Лемпорта, включно із відповідним виразним засобом TLA+. У свою чергу, формалізовані подання (формальні специфікації) на основі TLA+, за рахунок математичної строгості і модульності формалізму, розглянуто як засоби уможливлення автоматизації процесу контролю шляхом формальної верифікації на основі методу TLC, а також на основі відповідного розвитку методу, призначеного до застосування за ітеративного підходу до організації процесу формальної верифікації при проєктуванні.

І первинні неформалізовані, і похідні від них формалізовані подання узагальнено у межах праці як артефакти, призначені до опрацювання на етапі проєктування у складі етапів процесу розроблення програмно-алгоритмічного забезпечення.

Викладений індуктивний підхід представлено у якості засобу, призначеного для вирішення допоміжної задачі, що постає при побудові похідних формалізованих подань – задачі варіювання рівня деталізації формалізованих подань. Доцільність такого кроку обумовлена, у тому числі, проявами ефекту експоненційного зростання простору станів для систем переходів, що будуються у процесі формальної верифікації, а також обмеженістю доступних розробникам часових і обчислювальних ресурсів.

Ключові слова: TLA, артефакт, верифікація, програмно-алгоритмічне забезпечення, проєктування, формальна специфікація.

Постановка проблеми. У контексті розроблення комп'ютерних систем критичного призначення складова людського фактору постає серед визначальних, оскільки вносить / розширює аспект недетермінізму стосовно запланованих сценаріїв функціонування розроблюваної системи у визначених режимах експлуатації. Така ситуація

обумовлює важливість застосування численних методів і засобів контролю, серед яких все більшого поширення набувають формальні методи і засоби, що обумовлено, у тому числі, високим ступенем придатності до автоматизованого застосування відповідних представників сімейства формальних методів перевірки на моделі (Model

Checking) [1, 2]. У якості відмінної риси зазначених методів варто вказати при цьому на те, що судження стосовно досліджуваної властивості розроблюваної системи виносяться не на підставі проведення перевірки системи / компонента системи безпосередньо, а на підставі контролю відповідних формалізованих подань – формальних специфікацій (ФС). Така особливість, у свою чергу, обумовлює необхідність проведення додаткового контролю, направлено на отримання достовірних свідчень стосовно правомірності поширення суджень за результатами верифікації ФС також і на відповідні первинні, у загальному випадку неформалізовані, подання. При цьому зазначений крок не є тривіальним. Причиною тому є, серед іншого, є і прояв ефекту експоненційного зростання простору станів систем переходів, які будуються у процесі формальної верифікації методами перевірки на моделі: у площинах і обчислювальних [3], і просторових витрат [4].

У охоплених нижче працях було показано, що прояв вказаного ефекту істотним чином залежить, у тому числі, від архітектурної складової одержуваних і досліджуваних ФС.

Об'єктом дослідження є процес проектування програмно-алгоритмічного забезпечення (ПАЗ) систем критичного призначення.

Зауваження: тут і надалі за текстом контекстне навантаження використовуваного поняття «архітектура» у межах словосполучення «архітектурна складова» є таким, що розширює зміст поняття «структура» – за рахунок залучення також і зв'язків між елементами структури.

У попередніх дослідженнях було виокремлено граничні випадки для архітектурної складової проектного ПАЗ: для випадку відсутності умовних переходів прояв ефекту експоненційного зростання простору станів виявився істотно помірнішим [3], у порівнянні з іншим граничним випадком, де паралелізм було подано згідно моделі чергування [5]. Для останнього випадку, для 2^4 змінних станів, мали місце близько $2 \cdot 10^6$ альтернативних шляхів від початкового до заключного стану системи переходів. Варто стосовно цього зауважити, що така специфіка узгоджується із відповідними тезами фундаментальних праць за напрямом – наприклад, праць лауреата премії Тюрінга – Лесли Лемпорта [6, с. 3].

Серед інших чинників, що обумовлюють стрімкість прояву озвученого ефекту – також і обраний розробником / колективом розробників рівень деталізації ФС. Зазначений вибір визначає, зокрема, кількість змінних станів, що фігурують

у ФС. І це, у свою чергу, спонукає потребу пошуку компромісного рішення – у частині досягнення балансу між обраним рівнем деталізації ФС, з урахуванням відповідної архітектурної складової, і супутніми обчислювальними і просторовими витратами на проведення верифікації методом перевірки на моделі [7, с. 5], з урахуванням доступних обчислювальних можливостей наявних програмно-апаратних систем.

Вказаний пошук типово проводиться розробниками, ґрунтуючись, у значній мірі, на їх досвіді. Такий канонічний підхід, однак, відкритими полишає питання, зокрема, у частині передбачуваності одержуваного корисного ефекту від застосування формальних методів і засобів у якості засобів контролю при проектуванні ПАЗ.

У контексті означеного вище об'єкту дослідження в роботі представлено розроблений підхід до вирішення важливої науково-технічної проблеми варіювання рівня деталізації ФС, у залежності від наявних обчислювальних ресурсів, а також враховуючи архітектурну складову ФС. При цьому результат вирішення даної проблеми розглянуто у якості складової комплексу засобів уможливлення реалізації уніфікованої методології встановлення достатності обраного рівня деталізації ФС.

Проблему опрацьовано у межах представленого індуктивного підходу з урахуванням наступних припущень:

- математичну строгість використовуваного формалізму подання ФС розглянуто як чинник сприяння однозначності і уніфікованості інтерпретації контекстного навантаження ФС;

- при опрацюванні рівнів деталізації ФС застосовано дуальний підхід: охоплено і випадок підтвердження несуперечливості ФС, і протилежну варіацію.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Серед показових прикладів результативності застосування формальних методів і засобів у процесі розроблення комп'ютерних систем критичного призначення постають, у тому числі, сценарії атомної енергетики Фінляндії, стосовно яких було засвідчено, що, у період з 2008 по 2020 рр., за рахунок застосування формальних методів і засобів, було виявлено 66 підтверджених помилок у ФС досліджуваних властивостей розроблюваних систем [8]. Автором при цьому відзначено важливість автоматизації процесу синтезу ФС.

Серед інших демонстративних сценаріїв критичних предметних областей, де у процесі розроблення ПАЗ комп'ютерних систем було успішно

залучено формальні методи і засоби у якості засобів контролю – у тому числі залізнична галузь [9, 10]. Серед відомих представників корпоративного сектору економіки – компанії Intel (сповіщено про виявлення 45 суттєвих суперечливостей) [11], Microsoft, Amazon [12] та ін.

Враховуючи контекст актуальних подій у державі, до прикладів, де залучення формальних методів і засобів супроводжувалося значимим корисним ефектом, варто долучити також і сценарії керування безпілотними літальними апаратами [13, 14].

Поєднує охоплені і подібні сценарії загальний підхід, що полягає в покладанні на досвід розробників при виборі рівня деталізації ФС, до яких застосовуються формальні методи і засоби, у тому числі поширений формальний метод перевірки на моделі TLC (TLA Checker), а також супутні засоби – темпоральна логіка дій TLA (Temporal Logic of Actions) і відповідний формалізм TLA+ Леслі Лемпорта [15].

Постановка завдання. Завдання представленого дослідження полягає у розробленні підходу до варіювання рівня деталізації ФС для результативного проведення формальної верифікації ФС при проектуванні ПАЗ систем критичного призначення. У відповідності до вказаного вище припущення стосовно залучення дуального підходу, результативним вважається і випадок підтвердження несуперечливості ФС, і випадок виявлення суперечливості / суперечливостей.

Викладення основного матеріалу. Для викладення розробленого індуктивного підходу до побудови формалізованих подань ПАЗ комп'ютерних систем, змістове навантаження згаданого вище поняття «архітектура» було розширено до такого, що є означенням поняття «артефакт» – сутності, що характеризується архітектурою і змістом [16]. Таку інтерпретацію було сформульовано як розширення відносно базової, запропонованої про-

фесором Мюнхенського технічного університету Манфредом Броєм, за рахунок заміщення поняттям «архітектура» поняття «структура» [17].

Крок у частині інтерпретації у якості артефактів і первинних, у загальному випадку неформалізованих, подань, і похідних від них формалізованих представлень ПАЗ здійснено для уніфікації процесу їх аналізу і опрацювання розробником / колективом розробників при проектуванні.

Охоплений вище понятійний апарат залучено у відповідності до підходу стосовно комплексного опрацювання показників функціональних і нефункціональних характеристик при проектуванні ПАЗ; графічна форма представлення зведена на рисунку 1 [18].

На рисунку 1 у якості засобів сполучення складових діаграми застосовано відношення агрегування і розширення. Використання саме відношення агрегування, а не композиції, призначене ставити наголос, що відповідні агреговані складові допустимі до інтерпретації і як елементи комплексної конструкції, і як автономні частини.

Представлений індуктивний підхід до побудови формалізованих подань, одержуваних при проектуванні ПАЗ, охоплює дві концептуальні площини опрацювання досліджуваних артефактів, у складі яких – і, у загальному випадку неформалізовані, первинні подання, і похідні від них формалізовані подання – ФС. При цьому ФС розглядаються як артефакти, залучення яких дозволяє проводити формальну верифікацію методом перевірки на моделі в автоматизованому режимі. У якості означених площин охоплено аналітичний рівень опрацювання артефактів і рівень реалізації. Рівень реалізації при цьому виокремлено як такий, на якому фігурують виразні засоби уможливлення автоматизації процесу опрацювання ФС у частині проведення їх контролю за показником несуперечливості шляхом застосування поширеного формального методу перевірки на моделі

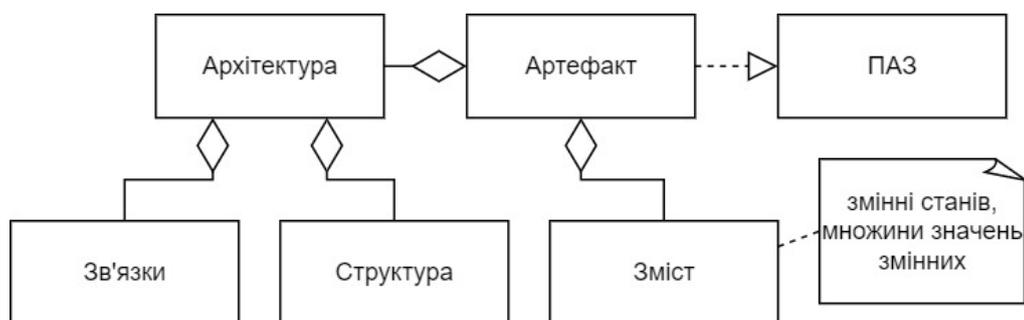


Рис. 1. Графічне представлення залученого понятійного апарату у формі UML-діаграми

TLC або розробленого розвитку цього методу, призначеного до використання за ітеративного підходу до організації процесу формальної верифікації [19].

Представлений індуктивний підхід полягає у виокремленні ієрархічних рівнів – у площинах і аналітичній, і реалізації: для цього було опрацьовано концепції «подій» і «дій» [20].

Трійки Гоара залучено для сполучення елементів спільного ієрархічного рівня. При цьому правило композиції Гоара застосовано для формування елементів наступного ієрархічного рівня [21, 22].

Запропонований індуктивний підхід полягає у поступальному висхідному зміщенні між суміжними ієрархічними рівнями ФС, починаючи від найнижчого, – допоки таким чином не буде сформована результуюча темпоральна формула на основі виразних засобів TLA+, що характеризується властивостями математичної строгості та модульності. Така формула призначена до опрацювання на виокремленому концептуальному рівні реалізації представленого підходу – шляхом застосування по відношенню до неї методу TLC або розробленого розвитку цього методу [19].

Дієвість представленого індуктивного підходу було підтверджено, у тому числі, для критичних сценаріїв аерокосмічної галузі і галузі енергетики [16, 23].

Подяки. Дослідження проведено у відповідності до вирішуваних задач науково-дослідної роботи № 0120U102683 «Розроблення спеціалізованих комп'ютерних технологій моделювання та опрацювання оперативної інформації в задачах енергетики», виконуваної відділом математичного та комп'ютерного моделювання Інституту про-

блем моделювання в енергетиці ім. Г.Є. Пухова НАН України.

Висновки. Таким чином, у роботі представлено розроблений індуктивний підхід до побудови формалізованих подань як артефактів, одержуваних і досліджуваних у процесі проєктування програмно-алгоритмічного забезпечення комп'ютерних систем, і призначених слугувати засобами контролю первинних, у загальному випадку неформалізованих, подань за показником їх несуперечливості.

Запропонований підхід реалізовано з урахуванням специфіки виразних засобів формалізму TLA+ темпоральної логіки дій TLA Леслі Лемпорта, і призначено до застосування у комплексі із формальним методом перевірки на моделі TLC або розвитком зазначеного методу у частині ітеративного підходу до організації процесу формальної верифікації. Такий крок уможливив отримання формалізованих подань, що характеризуються наступними властивостями: математична строгість, модульність. Модульності, у свою чергу, було досягнуто шляхом виокремлення ієрархічних рівнів і оперування при цьому конструкціями «подій» і «дій».

Подальші дослідження спрямовано на розв'язання представленого підходу у частині формулювання і узагальнення рекомендацій стосовно встановлення достатності обраного рівня деталізації формалізованих подань, по відношенню до яких в автоматизованому режимі застосовується поширений формальний метод перевірки на моделі TLC, або згаданий вище розвиток зазначеного методу, що дозволяють проводити контроль артефактів проєктування, у тому числі, за показником їх несуперечливості.

Список літератури:

1. Clarke E. M., Grumberg O., Kroening D., Peled D., Veith H. *Model checking*: 2nd ed. Massachusetts: The MIT Press, 2018.
2. Шкарупило В.В., Зайко Т.А., Шкарупило В.В., Тіменко А.В. Обґрунтування доцільності формалізації артефактів процесу розроблення програмних систем // *Світ наукових досліджень. Випуск 29: матеріали Міжнародної мультидисциплінарної наукової інтернет-конференції* (м. Тернопіль, Україна, м. Ополь, Польща, 23–24 квітня 2024 р.) / за ред. : О. Патряк та ін. ГО “Наукова спільнота”, WSZIA w Opolu. Тернопіль: ФОП Шпак В.Б. 2024. С. 88–90. URL: <https://www.economy-confer.com.ua/full-article/5512/>
3. Shkarupylo V.V., Tomičić I., Kasian K.M. The investigation of TLC model checker properties. *Journal of Information and Organizational Sciences*, 2016, Vol. 40, No. 1. P. 145–152. DOI: <https://doi.org/10.31341/jios.40.1.7>
4. Шкарупило В.В., Чемерис О.А., Душеба В.В. Оцінювання просторової складності задачі формальної верифікації, вирішуваної методом перевірки на моделі. *Вчені записки Таврійського національного університету імені В.І.Вернадського, серія «Технічні науки»*, 2020, Том 31 (70), № 5. С. 147–151. DOI: <https://doi.org/10.32838/2663-5941/2020.5/24>
5. Shkarupylo V. V., Tomičić I., Kasian K. M., Alsayaydeh J. A. J. An approach to increase the effectiveness of TLC verification with respect to the concurrent structure of TLA+ specification. *International Journal of*

Software Engineering and Computer Systems, 2018. Vol. 4, No. 1. P. 48–60. DOI: <https://doi.org/10.15282/ijsecs.4.1.2018.4.0037>

6. Lamport L. *A science of concurrent programs* (preprint, version of 16 March 2024). URL: <https://lamport.azurewebsites.net/tla/science.pdf> (Accessed: 10.07.2024)

7. Clarke E. M., Henzinger T. A., Veith H., Bloem R. *Handbook of model checking*. Springer Publishing Company, Inc., 2018. 1210 p. DOI: <https://doi.org/10.1007/978-3-319-10575-8>

8. Pakonen A. Model-checking I&C logics – insights from over a decade of projects in Finland. In *12th Nuclear Plant Instrumentation, Control and Human-Machine Interface Technologies, NPIC&HMIT 2021*. American Nuclear Society (ANS), 2021. P. 792–801 DOI: <https://doi.org/10.13182/T124-34322>

9. Resch S., Paulitsch M. Using TLA+ in the development of a safety-critical fault-tolerant middleware. *Software Reliability Engineering Workshops : Proc. 2017 IEEE International Symposium* (Toulouse, France, 23–26 October 2017). P. 146–152. DOI: <https://doi.org/10.1109/ISSREW.2017.43>

10. Butler M., Körner P., Krings S., Lecomte T., Leuschel M., Mejia L.-F., Voisin L. The first twenty-five years of industrial use of the B-method. *Formal Methods for Industrial Critical Systems, FMICS 2020 : 25th Int. Conf.* / eds. M. ter Beek, D. Ničković (Vienna, Austria, September 2–3, 2020). 2020. Lecture Notes in Computer Science, Vol. 12327. Springer, Cham. P. 189–209. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-030-58298-2_8

11. Beers R. Pre-RTL formal verification: an Intel experience. *Design Automation Conference, DAC '08: Proceedings of the 45th annual Conference* (Anaheim, California, June 2008). New York, NY, United States : Association for Computing Machinery, 2008. P. 806–811. DOI: <https://doi.org/10.1145/1391469.1391675>

12. Kuppe M. A., Lamport L., Ricketts D. The TLA+ Toolbox. *Formal integrated development environment, F-IDE 2019 : 5th Workshop* (Porto, Portugal, October 7, 2019). EPTCS 310, 2019. P. 50–62. DOI: <http://doi.org/10.4204/EPTCS.310.6>

13. Surya A. et al. Formal specification and verification of time-sensitive drone systems using TLA+: a case study. *Proc. 2024 IEEE International Conference on Interdisciplinary Approaches in Technology and Management for Social Innovation (IATMSI)*, Gwalior, India, 14-16 March 2024. DOI: <https://doi.org/10.1109/IATMSI60426.2024.10503145>

14. Das M., Mohan B. R., Guddeti R. M. R. Formal specification and verification of drone system using TLA+: a case study. *2022 IEEE/ACIS 23rd International Conference on Software Engineering, Artificial Intelligence, Networking and Parallel/Distributed Computing (SNPD)*, Taichung, Taiwan, 07–09 December 2022. DOI: <https://doi.org/10.1109/SNPD54884.2022.10051801>

15. Lamport L. *Specifying systems: The TLA+ language and tools for hardware and software engineers*. Boston, MA, United States : Addison-Wesley Longman Publishing Co., Inc., 2002. 364 p. DOI: <https://dl.acm.org/doi/10.5555/579617>

16. Shkarupylo V., Blinov I., Dusheba V., Alsayaydeh J. A. J. Case driven TLC model checker analysis in energy scenario. *CEUR Workshop Proceedings*, 2023. Vol. 3392. P. 65–75. ISSN 1613-0073. DOI: <https://doi.org/10.32782/cm/3392-6>

17. Broy M. A logical approach to systems engineering artifacts and traceability: from requirements to functional and architectural views. *Engineering dependable software systems : NATO Science for Peace and Security Series – D: Information and Communication Security* / eds. M. Broy, D. Peled, G. Kalus. Amsterdam : IOS Press, 2013. Vol. 34. P. 1–48. DOI: <https://doi.org/10.3233/978-1-61499-207-3-1>

18. Шкарупило В.В., Душеба В.В., Скрупський С.Ю., Блінов І.В. Стратифікована модель подання нефункціональних характеристик системи критичного призначення при проектуванні. *Електронне моделювання*, 2022. Т. 44, № 2 (2022). С. 90–106. ISSN 0204–3572. DOI: <https://doi.org/10.15407/emodel.44.02.090>

19. Шкарупило В., Блінов І., Кучанський В., Давидюк А., Дімітрієва Д. Методи і засоби контролю артефактів процесу проектування програмно-алгоритмічної складової систем критичного призначення: монографія / за заг. ред. В. В. Шкарупила. Publishing House «European Scientific Platform», 2023. 120 с. ISBN: 978-617-8126-22-3 DOI: <https://doi.org/10.36074/mzkappasskp-monograph.2023>

20. Шкарупило В. В., Блінов І. В. Сценарії, методи та засоби формальної верифікації артефактів процесу проектування систем критичного призначення : монографія. Вінниця : ГО «Європейська наукова платформа», 2021. – 104 с. ISBN 978-617-8037-55-0 DOI <https://doi.org/10.36074/smtzfvappskp-monograph.2021>

21. Shkarupylo V., Chemerys O., Dusheba V., Kudermetov R., Oliinyk A. On Hoare triples applicability to dependable system specification synthesis. *Dependable Systems, Services and Technologies, DESSERT'2020 : The 11th International Conference* (Kyiv, Ukraine, May 14–18, 2020). P. 371–375. DOI: <https://doi.org/10.1109/DESSERT50317.2020.9125074>

22. Hoare C. A. R. Communicating sequential processes. *Communications of the ACM*, 1978. Vol. 21, No. 8. P. 666–677.

23. Shkarupylo V.V., Blinov I.V., Chemeris A.A., Dusheba V.V., Alsayaydeh J.A.J. On Applicability of Model Checking Technique in Power Systems and Electric Power Industry. In: Zaporozhets A. (eds) *Systems, Decision and Control in Energy III. Studies in Systems, Decision and Control*, 2022, Vol. 399. Springer, Cham. pp. 3-22. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-030-87675-3_1

Shkarupylo V.V., Dusheba V.V., Zaiko T.A., Shkarupylo V.V., Skrupsky S.Yu. INDUCTIVE APPROACH TO SOFTWARE AND ALGORITHMIC COMPONENT FORMALIZED REPRESENTATIONS CONSTRUCTION AT DESIGN

Nowadays, the level of complexity of modern computer systems, on the basis of which both production and non-production subject-oriented scenarios are implemented, is growing. This statement is also true with respect to the safety-critical systems – systems whose faults and failures may lead to the unwanted consequences of a significant scale. Predictability of such systems functioning is achieved, in particular, due to the complex application of control methods and tools with respect to the software and algorithmic component representations at the design stage of development process. These representations are informal in general. Specified obstacle, among other limitations, complicates the process of representations control based on the index of software and algorithmic component consistency.

As a control method, the widespread TLC (TLA Checker) model checker has been considered. As the corresponding formal tools, the Temporal Logic of Actions (TLA, by Leslie Lamport) and the related TLA+ formalism have also been encompassed. In its turn, formalized representations (formal specifications) based on the TLA+, due to the mathematical rigor and modularity of the formalism, have been considered as the means of enabling the automation of the control process through formal verification based on the TLC method, as well as on the basis of the appropriate development of the method intended for use during the iterative approach to the organization of the process of formal verification at design.

Both the initial non-formalized and derived from them formalized representations have been generalized within the paper as artifacts intended for processing at the design stage of software and algorithmic component development process.

The introduced inductive approach is presented as a tool intended for solving the auxiliary problem that arises during the construction of the derived formalized representations – the problem of varying the atomicity level of formalized representations. The expediency of such a step is, among other factors, due to the occurrence of the effect of exponential growth of the state space of the transition systems constructed during the process of formal verification, as well as to the limitation of time and computing resources available to developers.

Key words: TLA, artifact, verification, software and algorithmic component, design, formal specification.

ЕНЕРГЕТИКА

УДК 373:534.1:620.193

DOI <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2024.4/34>

Бовсуновський А.П.

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

Носаль О.Ю.

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

ОСОБЛИВОСТІ ВІБРАЦІЙНОЇ ДІАГНОСТИКИ ПОШКОДЖЕННЯ ЛОПАТОК ТУРБІН

Статтю присвячено дослідженню лопатки турбін, які в процесі експлуатації зазнають інтенсивних механічних (статичних і динамічних) і термічних навантажень у корозійно агресивному середовищі. Наслідком такого навантаження є поступове накопичення розсіяного втомного пошкодження, яке зрештою локалізується у вигляді тріщини втоми. При досягненні тріщиною критичного розміру виникає небезпека руйнування лопатки з катастрофічними наслідками для всієї турбіни. Вчасне виявлення пошкодження лопатки можливе на етапі ремонту турбіни з використанням вібраційної діагностики.

Мета. Метою роботи є створення аналітичного підходу, що дозволяє моделювати коливання лопатки турбіни з тріщиною втоми, а також дослідження впливу параметрів тріщини та геометричних параметрів лопатки на власні частоти коливань лопатки для оцінки ефективності вібраційної діагностики пошкоджень.

Методи. Для вирішення задачі в роботі використано класичну теорію коливань. Вплив поверхневої тріщини на піддатливість лопатки визначено з використанням підходів механіки руйнування.

Результати. В роботі представлено результати дослідження впливу поверхневої поперечної тріщини на власні частоти коливань лопатки турбіни. В результаті експериментально-аналітичного дослідження з'ясовано вплив параметрів тріщини (розміру та розташування тріщини) та геометричних характеристик лопатки на власні частоти коливань лопатки.

Висновки. В роботі показано, що вібродіагностика лопаток турбін, заснована на зміні власних частот є достатньо чутливою для виявлення відносно невеликих тріщин, розмір яких не становить загрози цілісності лопаток. Встановлено, що жорсткість лопатки впливає на чутливість такої вібродіагностики: чим жорсткішою є лопатка, тим вищою є чутливість власних частот до наявності тріщини.

Ключові слова: вібраційні діагностика, лопатки турбін, власні частоти, тріщина.

Постановка проблеми. Лопатки турбін в процесі експлуатації зазнають інтенсивних механічних (статичних і динамічних) і термічних навантажень у корозійно агресивному середовищі. Наслідком такого навантаження є поступове накопичення розсіяного втомного пошкодження, яке зрештою локалізується у вигляді тріщини втоми. При досягненні тріщиною критичного розміру виникає небезпека руйнування лопатки з катастрофічними наслідками для всієї турбіни. Вчасне виявлення пошкодження лопатки можливе на етапі ремонту турбіни з використанням вібраційної діагностики.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Багато елементів енергетичного обладнання в реаль-

них умовах експлуатації зазнають спільної або роздільної дії динамічного навантаження, температури та агресивного середовища, що призводить до виникнення втомних та термовтомних тріщин, корозійного розтріскування та інших видів пошкоджень. Виявлення таких пошкоджень, наприклад, в елементах парової турбіни в процесі її експлуатації є складною проблемою, вирішення якої стикається з значними труднощами [1]. Використання локальних неруйнівних методів діагностики пошкоджень можливе лише під час проведення ремонтних робіт і потребує значних витрат часу.

Динамічні характеристики непошкодженого тіла та тіла з порушеною суцільністю, як пра-

вило, суттєво різняться. Ця різниця динамічних характеристик, обумовлена зміною жорсткості, може використовуватися для діагностування пошкодження (наприклад, тріщини втомі) та визначення його параметрів (розмірів та розташування). На цій ідеї заснована вібраційна діагностика пошкодження, основною перевагою якої над локальними методами діагностики є те, що вона є інтегральною, тобто характеризує стан об'єкта в цілому і тому потребує значно менше часу для отримання результату діагностики відносно габаритних конструкцій. Багато досліджень присвячено розробці вібраційних методів діагностики пошкодження, заснованих на взаємозв'язку вібраційних характеристик (наприклад, власні частоти [2–4] і форми [5] коливань), характеристик демпфування [6] або нелінійних ефектів (наприклад, виникнення вищих гармонік у спектрі коливань [7, 8], виникнення суб- та супергармонічних резонансів [9], зміщення антирезонансних частот [10]) з параметрами пошкодження. Кожен з цих методів має свої переваги і недоліки, але жоден з них не є універсальним.

Аналіз зміни вібраційних характеристик реальних конструкцій у разі виникнення пошкодження є складною проблемою. Однак вона значно спрощується, якщо конструкцію або її елементи з достатньою для інженерної практики точністю подати у вигляді стрижневої коливальної системи з крайовими умовами та умовами навантаження, близькими до реальних.

Найбільш просто характеристики коливань будь-якого стрижневого елемента визначаються у припущенні, що тріщина не змінює його форму коливань. Це дозволяє при заданій формі коливань елемента розглядати його як систему з одним ступенем вільності [11]. Отримуване в цьому випадку рішення, строго кажучи, справедливе за відносно малої глибини тріщини.

Точність аналітичного розв'язку задачі про коливання лопатки з тріщиною багато в чому визначається вибором моделі тріщини. У літературних джерелах представлений широкий спектр таких моделей: тріщина подається у вигляді пружини [12, 13], пружного шарніра [14], вирізу [15–17], області зі зменшеним модулем пружності [13] або її вплив враховується напівемпіричними функціями, що описують розподіл напружень та деформацій по всьому об'єму стрижня з тріщиною [18]. При цьому у всіх випадках, за винятком роботи [12], моделювалися коливання стрижня з так званою відкритою тріщиною (така тріщина вважається відкритою на обох півциклах коли-

вань), що не відображає повною мірою умови поведінки тріщин втомі, які періодично закриваються. Жорсткість стрижня з відкритою тріщиною вважається однаковою на обох півциклах коливання, а жорсткість стрижня з тріщиною, що закривається – різною. В другому випадку виникає суттєва нелінійність коливальної системи.

Однією з проблем, яка відрізняє визначення вібраційних характеристик призматичного стрижня і лопатки, є розрахунок геометричних характеристик поперечного перерізу лопатки. Інша проблема – визначення зміни жорсткості (піддатливості) поперечного перерізу лопатки при виникненні тріщини.

Постановка завдання. Метою роботи є створення аналітичного підходу, що дозволяє моделювати коливання лопатки турбіни з тріщиною, що закривається, для вирішення як прямої (визначення динамічних характеристик стрижня при заданих розмірі і місцезнаходженні тріщини), так і зворотної (оцінка параметрів тріщини за відомими значеннями відповідних динамічних характеристик), а також дослідження впливу параметрів тріщини і геометричних параметрів лопатки на власні частоти коливань лопатки для цілей вібраційної діагностики пошкодження.

Виклад основного матеріалу дослідження. Методика розрахунку власних частот коливань лопатки. Розв'язання задачі про згинальні коливання лопатки (рис. 1) з крайовою тріщиною, що закривається, будується на основі синтезу рішень диференціального рівняння, що описує вільні поперечні коливання стрижневого елемента Бернуллі-Ейлера без урахування демпфування [19]

$$\frac{\partial^4 y(x,t)}{\partial x^4} + \frac{\rho F}{EI_u} \frac{\partial^2 y(x,t)}{\partial t^2} = 0, \quad (1)$$

де E і ρ – відповідно модуль пружності і густина матеріалу лопатки; I_u і F – момент інерції відносно головної осі (рис. 1, б) і площа поперечного перерізу лопатки, які вважаються незмінними по її довжині.

Крайові умови для кута повороту $\theta_{ij}(x)$, згинального моменту $M_{ij}(x)$, поперечної сили $Q_{ij}(x)$ та умови сполучення ділянок 1 і 2 лопатки, розділених тріщиною, мають вигляд

$$M_{i1}(L) = I_m \omega_{oi}^2 k_{oi} [A_{i1} V(k_{oi} L) + B_{i1} S(k_{oi} L) + C_{i1} T(k_{oi} L) + D_{i1} U(k_{oi} L)];$$

$$Q_{i1}(L) = -m_i \omega_{oi}^2 [A_{i1} S(k_{oi} L) + B_{i1} T(k_{oi} L) + C_{i1} U(k_{oi} L) + D_{i1} V(k_{oi} L)];$$

$$w_{i1}(L_c) = w_{i2}(L_c);$$

$$\theta_{i1}(L_c) - \theta_{i2}(L_c) = \kappa_c M_{i1}(L_c); \quad M_{i1}(L_c) = M_{i2}(L_c);$$

$$Q_{i1}(L_c) = Q_{i2}(L_c); \quad w_{i2}(0) = 0; \quad \theta_{i2}(0) = 0,$$

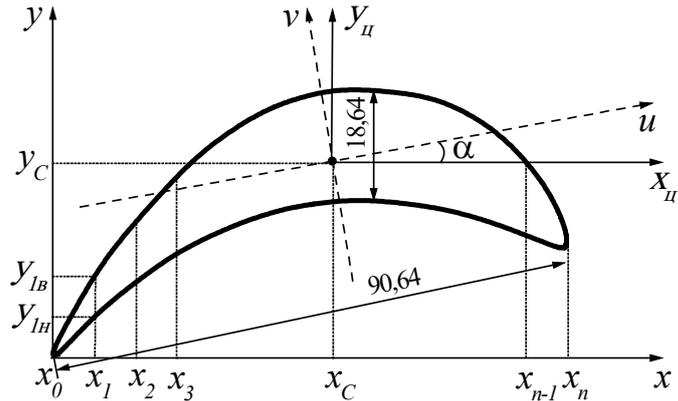


Рис. 1. Лопатка турбіни К-1000-60/3000 (а) і її поперечний переріз (б)

де $k_{oi}^4 = \omega_{oi}^2 \rho F / EI_u$; L – довжина лопатки; L_c – відстань від заземлення до перерізу з тріщиною; ω_{oi} – кутова частота лопатки з відкритою тріщиною; κ_c – зміна піддатливості перерізу з тріщиною; m_L – зосереджена маса на кінці лопатки; I_m – момент інерції зосередженої маси; S, T, U, V – функції Кривої.

Частотне рівняння, що визначає власні частоти коливань лопатки з відкритою тріщиною (тобто тріщина, яка вважається відкритою на обох напівциклах коливань), має вигляд

$$\begin{vmatrix} U(\varphi_i) - q_i V(\varphi_i) & V(\varphi_i) - q_i S(\varphi_i) & S(\varphi_i) - q_i T(\varphi_i) & T(\varphi_i) - q_i U(\varphi_i) & 0 & 0 \\ T(\varphi_i) + g_i S(\varphi_i) & U(\varphi_i) + g_i T(\varphi_i) & V(\varphi_i) + g_i U(\varphi_i) & S(\varphi_i) + g_i V(\varphi_i) & 0 & 0 \\ S(\varphi_i) & T(\varphi_i) & U(\varphi_i) & V(\varphi_i) & -S(\varphi_i) & -T(\varphi_i) \\ V(\varphi_i) - r_i U(\varphi_i) & S(\varphi_i) - r_i V(\varphi_i) & T(\varphi_i) - r_i S(\varphi_i) & U(\varphi_i) - r_i T(\varphi_i) & -T(\varphi_i) & -U(\varphi_i) \\ U(\varphi_i) & V(\varphi_i) & S(\varphi_i) & T(\varphi_i) & -S(\varphi_i) & -T(\varphi_i) \\ T(\varphi_i) & U(\varphi_i) & V(\varphi_i) & S(\varphi_i) & -V(\varphi_i) & -S(\varphi_i) \end{vmatrix} = 0,$$

де $\varphi_i = k_{oi} L$; $\psi_i = L_c \varphi_i / L$; $q_i = I_m \varphi_i^3 / \rho FL^3$; $g_i = m_L \varphi_i / \rho FL$; $r_i = EI_u \kappa_c \varphi_i / L$.

Зміна піддатливості перерізу з тріщиною визначалась енергетичним методом, коли порівнюється зміна енергії деформації тіла при виникненні в ньому тріщини, визначена на основі підходів механіки руйнування і на основі класичної механіки [19].

Для поверхневої тріщини нормального відриву (рис. 2) за умови плоского напруженого стану зміна енергії деформації лопатки визначається наступним рівнянням

$$\Delta U = \frac{C}{E} \int_0^a K_I^2 d\gamma, \quad (3)$$

де K_I – коефіцієнт інтенсивності напружень (КІН); a – глибина тріщини; C – довжина фронту тріщини, яка в даному випадку визначається за формулою

$$C = 2 \cdot r \cdot \arccos\left(1 - \frac{a}{r}\right),$$

в якій r – радіус кола, що описує фронт тріщини. У випадку, коли виконується співвідношення $r = 0,75h$ (h – найбільша висота поперечного перерізу лопатки, див. рис. 2) КІН є однаковим по фронту тріщини і визначається рівнянням [20]

$$K_I = \sigma_c \sqrt{\pi a} (1,13211 - 1,87278\gamma + 0,75369\gamma^2), \quad (4)$$

де $\gamma = a/h$ – відносна глибина тріщини ($\gamma \leq 0,65$); σ_c – механічні напруження в перерізі з тріщиною.

Тоді рівняння (3) для визначення зміни енергії деформації лопатки набуває вигляду

$$\Delta U = \frac{2}{E} \sigma_c^2 \pi a^2 r \cdot \arccos\left(1 - \frac{a}{r}\right) \xi, \quad (5)$$

де

$$\xi = 1,28167 - 2,1202 + 1,73794^2 - 0,70575^3 + 0,11361^4.$$

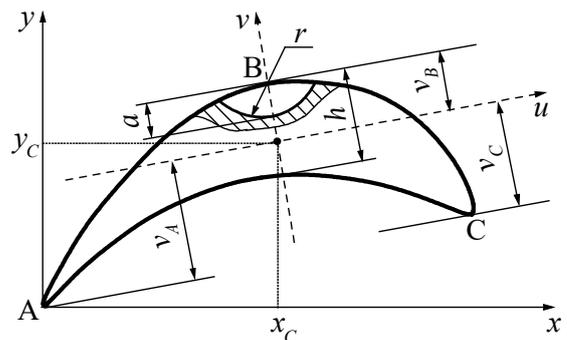


Рис. 2. Поперечний переріз лопатки з тріщиною

З іншого боку цю ж енергію можна визначити через зміну піддатливості перерізу при виникненні в ньому тріщини (k_c), а саме

$$\Delta U = 0,5 \kappa_c M^2, \quad (6)$$

де M – згинальний момент у перерізі з тріщиною.

З рівнянь (5) і (6) отримуємо

$$\kappa_c = \frac{4}{EW_u^2} \pi a^2 r \cdot \arccos\left(1 - \frac{a}{r}\right) \xi, \quad (7)$$

де W_u – момент опору поперечного перерізу лопатки. Для точок А, В і С перерізу лопатки координати для визначення цього моменту через відомий момент інерції I_u ($W_u=I_u/v$) становлять $v_A=21,5$ мм; $v_B=14,5$ мм; $v_C=19,1$ мм (рис. 2).

Однією з проблем вирішення задачі про коливання лопаток є визначення моментів інерції поперечного перерізу відносно головних осей.

Метод сіток, який зазвичай використовується для визначення геометричних характеристик поперечного перерізу лопатки, є трудомістким, незручним і неточним. Тому в роботі ці геометричні характеристики визначалися аналітично. Для цього профіль лопатки був побудований у ортогональній системі координат x - y у певному масштабі (рис. 1, б). Орієнтація і розташування профілю у цій системі координат є довільними.

Протяжність лопатки по осі x поділяється на n однакових відрізків (кроків розбиття)

$$\Delta_x = \frac{x_n - x_0}{n}. \quad (8)$$

Тоді площа поперечного перерізу лопатки визначається за формулою

$$F = \frac{\Delta_x}{2} \sum_{i=1}^n (Y_{i\sigma} - Y_{in}), \quad (9)$$

де $Y_{i\sigma} = y_{i\sigma} + y_{(i-1)\sigma}$; $Y_{in} = y_{in} + y_{(i-1)n}$. Рис. 1, б ілюструє, яким саме чином для кожного значення абсциси x_i визначається ордината верхньої ($y_{i\sigma}$) і нижньої (y_{in}) границі профіля.

Статичні моменти перерізу відносно осей x і y визначаються за наступними формулами

$$S_x = \frac{\Delta_x}{8} \sum_{i=1}^n (Y_{i\sigma}^2 - Y_{in}^2), \quad (10)$$

$$S_y = \frac{\Delta_x^2}{8} \sum_{i=1}^n (i - 0,5)(Y_{i\sigma}^2 - Y_{in}^2). \quad (11)$$

Далі визначаємо координати центру ваги перерізу

$$x_c = \frac{S_y}{F}; \quad y_c = \frac{S_x}{F}. \quad (12)$$

Осьові моменти інерції і відцентровий момент інерції поперечного перерізу лопатки розраховуємо за формулами

$$I_x = \frac{\Delta_x}{24} \sum_{i=1}^n (Y_{i\sigma}^3 - Y_{in}^3), \quad (13)$$

$$I_y = \frac{\Delta_x^3}{6} \sum_{i=1}^n [i^3 - (i-1)^3](Y_{i\sigma} - Y_{in}), \quad (14)$$

$$I_{xy} = \frac{\Delta_x^2}{16} \sum_{i=1}^n [i^2 - (i-1)^2](Y_{i\sigma}^2 - Y_{in}^2). \quad (15)$$

Відповідні моменти інерції відносно центральних осей x_u - y_u і кут повороту центральних осей α , що визначає напрям головних осей u - v , визначаємо з відомих формул [21]

$$I_{x_u} = I_x - y_c^2 F, \quad (16)$$

$$I_{y_u} = I_y - x_c^2 F, \quad (17)$$

$$I_{x_u y_u} = I_{xy} - x_c y_c F. \quad (18)$$

$$\alpha = \frac{1}{2} \arctg \left(\frac{2I_{x_u y_u}}{I_{y_u} - I_{x_u}} \right). \quad (19)$$

Тоді головні моменти інерції поперечного перерізу лопатки розраховуються наступним чином

$$I_u = I_{x_u} \cos^2 \alpha + I_{y_u} \sin^2 \alpha - I_{x_u y_u} \sin 2\alpha, \quad (20)$$

$$I_v = I_{x_u} \sin^2 \alpha + I_{y_u} \cos^2 \alpha + I_{x_u y_u} \sin 2\alpha. \quad (21)$$

На рис. 3 наведено приклади розрахунку геометричних характеристик робочої лопатки 1-го ступеня турбіни К-1000-60/3000 (профіль і розміри саме цієї лопатки представлено на рис. 1, б) як функції кількості кроків розбиття n . У випадку, що розглядається, $x_n=88,8$ мм.

Для виконання цих розрахунків верхню і нижню границі профілю лопатки було апроксимовано степеневими поліномами виду

$$y_\sigma = -0,00903 + 2,32287 \cdot x - 0,03959 \cdot x^2 + 7,30678 \cdot 10^{-4} \cdot x^3 - 8,95067 \cdot 10^{-6} \cdot x^4 + 5,35391 \cdot 10^{-8} \cdot x^5 - 1,22231 \cdot 10^{-10} \cdot x^6$$

$$y_n = -0,11218 + 1,03108 \cdot x - 0,00481 \cdot x^2 - 1,00267 \cdot 10^{-5} \cdot x^3 + 5,45339 \cdot 10^{-8} \cdot x^4$$

Як видно з рис. 3, достатня для практичних цілей точність визначення основних геометричних характеристик поперечного перерізу лопатки досягається при $n \geq 10$.

Перевірка достовірності наведеного вище аналітичного підходу до розрахунку власної частоти коливань лопатки з поверхневою тріщиною була виконана на прикладі лопатки компресора газотурбінного двигуна Д-36, виготовленої з титанового сплаву ВТ-3-1 (рис. 4). Геометричні характеристики її поперечного перерізу були визначені на основі формул (8)-(21), в яких $n=15$, $x_n=50$ мм. Зокрема, було визначено, що головний момент інерції лопатки відносно осі u дорівнює $I_u=819,3$ мм⁴.

Подальші розрахунки першої власної частоти коливань лопатки з сплаву ВТ-3-1 базувались на використанні рівнянь (1)-(7), в яких було прийнято $E=115$ ГПа; $\rho=4500$ кг/м³; $L=110$ мм; $L_c=10$ мм; $h=6$ мм; $v_B=3,83$ мм.

Експериментальні дослідження цієї лопатки [6] продемонстрували, що поверхнева тріщина з розмірами $2c=9,7$ мм і $a=1,8$ мм (рис. 4) зумов-

лює відносне зменшення частоти першої форми її коливань $f_c/f=0,995$. Розрахунки власної частоти першої форми коливань лопатки на основі наведеної вище теорії для тієї ж глибини тріщини ($a=1,8$ мм) показали відносне зменшення частоти на рівні $f_c/f=0,992$.

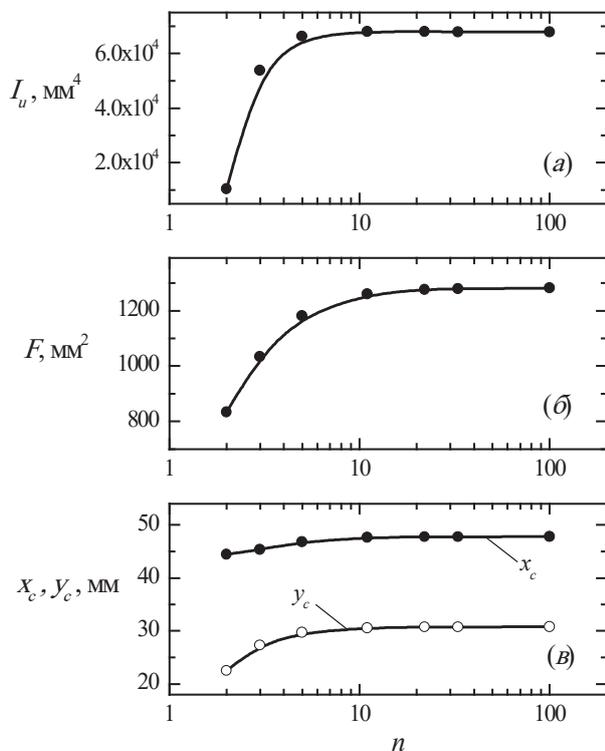


Рис. 3. Момент інерції відносно головної осі u (а), площа (б) і координати центра ваги (в) поперечного перерізу лопатки турбіни як функція кількості кроків розбиття n

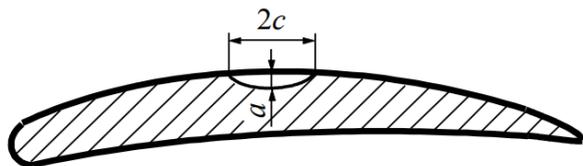


Рис. 4. Поперечний переріз з тріщиною лопатки газотурбінного двигуна Д-36

Таким чином, запропонований аналітичний підхід до оцінки впливу тріщини на власні частоти коливань лопатки є достатньо точним і прийнятним для аналітичного дослідження впливу параметрів лопатки на чутливість власних частот коливань до наявності тріщини.

Аналітичні дослідження впливу параметрів тріщини і геометричних характеристик лопатки на власну частоту першої форми її коливань були виконані стосовно лопатки турбіни К-1000-60/3000 (рис. 1), виготовленої з сталі 20Х13. В розрахунках було прийнято $E=200$ ГПа; $\rho=7800$ кг/м³;

$L=112$ мм; $h=18,64$ мм; $I_u=67971,4$ мм⁴; $v_B=14,5$ мм (для довідки – $\alpha=11,2^\circ$).

Рішення частотного рівняння (2) дає змогу отримати власні частоти коливань лопатки з відкритою тріщиною. Такий стан тріщини є теоретично можливим за значення асиметрії циклу, яка перевищує амплітуду коливань. Для симетричного циклу коливань, характерного для роботи лопаткового апарату парових турбін, має місце періодичне відкриття-закриття тріщини, тобто маємо тріщину, що закривається. Цю частоту можна визначити, знаючи власну частоту непошкодженої лопатки (f) і лопатки з відкритою тріщиною (f_o) [22], тобто

$$f_c = \frac{2ff_o}{f + f_o} \quad (22)$$

Рис. 5 ілюструє вплив відносної глибини тріщини на відносну зміну власної частоти першої форми коливань лопатки. Як видно, вплив відкритої тріщини на власну частоту коливань лопатки майже вдвічі перевищує вплив тріщини, що закривається. Так при відносній глибині тріщини $a/h=0,6$ зменшення частоти лопатки з тріщиною, що закривається, і з відкритою тріщиною досягає відповідно 24 і 39%, а при відносній глибині тріщини $a/h=0,2$ – 4,3 і 8,2%. Такі зміни частоти є достатніми для їх експериментального виявлення, а отже, для надійної вібродіагностики тріщини. В той же час зменшення частоти відносно невеликої тріщини ($a/h=0,1$) становить 1 і 2%, відповідно, що може бути недостатнім для цілей вібродіагностики з огляду на погрішність експерименту і інші технічні фактори. До останніх, зокрема, слід віднести певний розкид значень власних частот непошкоджених лопаток, тобто початковий рівень частот, відносно якого здійснюється вібродіагностика.

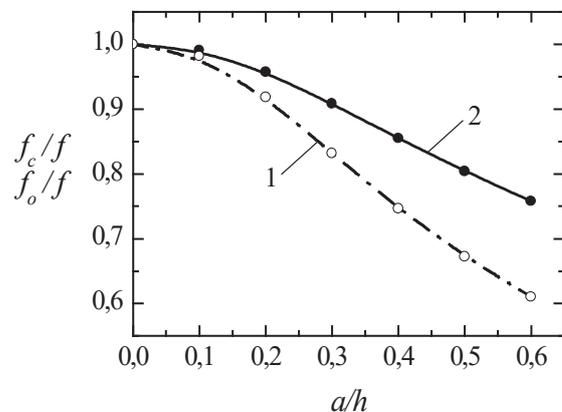


Рис. 5. Залежність власної частоти першої форми коливань лопатки турбіни від відносної глибини відкритої (1) і тої, що закривається (2), тріщини ($L_c=0$)

Особливістю вібродіагностики пошкодження, заснованої на зміні власних частот коливань, є необхідність даних про власну частоту (чи частоти) коливань лопатки у непошкодженому стані. Паспортизувати в цьому сенсі кожну лопатку парової турбіни є практично нереальним. Тому найбільш імовірним є використання осередненого значення власної частоти коливань для лопаток певного типу. Таким чином, розкид реальних значень власних частот для певної партії лопаток відносно осередненого їх значення, яке може досягати кількох відсотків, може суттєво вплинути на результати вібродіагностики відносно малих тріщин. У той же час, тріщини, відносні розміри яких задовольняють умову $a/h \geq 0,2$, надійно діагностуються за зміною власної частоти.

Залежності, продемонстровані на рис. 5, отримані для випадку, коли тріщина знаходиться біля основи пера лопатки ($L_c=0$), тобто в найбільш напруженому перерізі лопатки при поперечних коливаннях за першою формою. Внаслідок різних причин (дефект матеріалу, пошкодження поверхні тощо) тріщина може виникнути на деякій відстані від защемлення по довжині лопатки. Вплив цього фактору на власну частоту коливань лопатки продемонстровано на рис. 6. Загалом вплив тріщини на власні частоти коливань лопатки є тим меншим, чим нижчим є відносний рівень напружень у перерізі з тріщиною. Як видно з рис. 6, тріщина, яка знаходиться посередині пера лопатки по довжині зменшує відносну зміну частоти першої форми її коливань у декілька разів у порівнянні з тріщиною біля защемлення (при $a/h=0,1, 0,3$ і $0,6$ – у 8,5, 7,4 і 5,5 разів, відповідно).

Для надійної діагностики тріщин майже по всій довжині пера лопатки можна використовувати відносну зміну декількох власних частот. В цьому випадку переріз з тріщиною хоча б для однієї форми коливань буде знаходитись у відносно напруженій області лопатки, що зумовить помітну зміну її частоти. З іншого боку, якщо переріз з тріщиною знаходиться в околі вузла напружень, в якому напруження при коливаннях за певною формою дорівнюють нулю, власна частота цієї форми коливань не буде змінюватись за будь-якого розміру тріщини. Саме тому використання декількох форм коливань лопатки сприяє підвищенню надійності вібродіагностики тріщин на основі зміни власних частот, але суттєво ускладнює методику вібродіагностики.

Ще один фактор, який суттєво впливає на чутливість власних частот коливань лопатки до наявності тріщини – це жорсткість лопатки. Жор-

сткість лопатки зменшували за рахунок збільшення її довжини.

На рис. 7 показано вплив тріщини на власну частоту першої форми коливань лопатки різної довжини. Тут і на рис. 8 прийнято, що $L_0=112$ мм. Якщо для найкоротшої (а, отже, найжорсткішої) лопатки найбільше падіння частоти в розглянутому діапазоні глибини тріщини досягає 24,2%, то збільшення довжини лопатки втричі зменшує падіння частоти до 11,0%. Тобто чутливість власної частоти коливань лопатки до наявності тріщини зменшується, але дещо повільніше, ніж жорсткість лопатки.

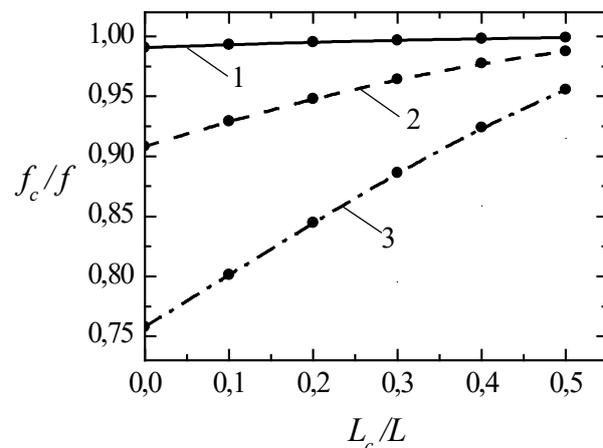


Рис. 6. Вплив місцезнаходження тріщини по висоті пера лопатки на власну частоту першої форми її коливань при різній відносній глибині тріщини, що закривається: (1) – $a/h=0,1$; (2) – $a/h=0,3$; (3) – $a/h=0,6$

Аналіз залежностей, наведених на рис. 8, дозволяє зробити порівняльну оцінку впливу жорсткості лопатки, яка змінюється за рахунок її довжини, на чутливість власної частоти коливань до наявності тріщини і на абсолютне значення власної частоти. Так при п'ятикратному збільшенні довжини лопатки чутливість зміни власної частоти першої форми коливань лопатки до наявності тріщини глибиною $a/h=0,1$, і $0,6$ зменшується у 4,9 і 3,4 раз, відповідно, тоді, як власна частота зменшується у 25 разів. Це означає, що чутливість вібродіагностики тріщин на основі зміни власних частот коливань лопаток залишається на прийнятному для практичного застосування рівні і для відносно довгих лопаток.

В той же час пропорційна зміна розмірів поперечного перерізу і довжини лопатки не призводить до зміни чутливості вібродіагностики пошкодження лопатки, заснованої на зміні власних частот.

Попри більш високу чутливість такої вібродіагностики для жорсткіших лопаток саме їхня висока жорсткість може стати проблемою практичної реалізації методики, оскільки власна частота першої форми коливань лопатки довжиною $L=112$ мм сягає значення 1659,4 Гц. Збудження резонансних коливань лопатки з такою частотою за допомогою відомих методик [6] непросто реалізувати, не кажучи вже про використання більш високих форм коливань для підвищення надійності вібродіагностики.

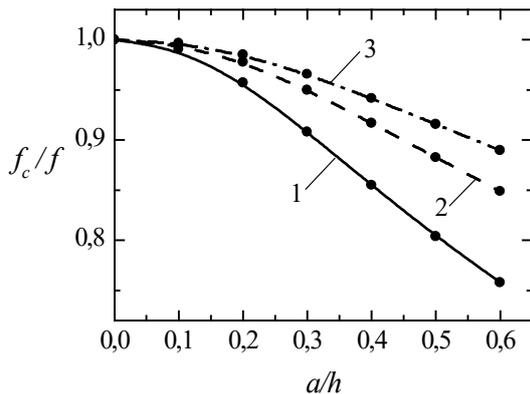


Рис. 7. Залежність зміни власної частоти першої форми коливань лопатки від відносної глибини тріщини при різних довжинах лопатки: (1) – L_0 ; (2) – $2L_0$; (3) – $3L_0$ ($L_c=0$)

Вирішення цієї проблеми можливе на основі використання сучасних методик модального аналізу коливань лопатки за результатами ударного тесту за допомогою, наприклад, обладнання і програмного забезпечення фірми Brüel&Kjær. Аналіз коливань, збуджених ударним навантаженням спеціальним молоточком, дозволяє визначити декілька власних частот коливань лопатки. Враховуючи малу тривалість такого тесту і достатньо

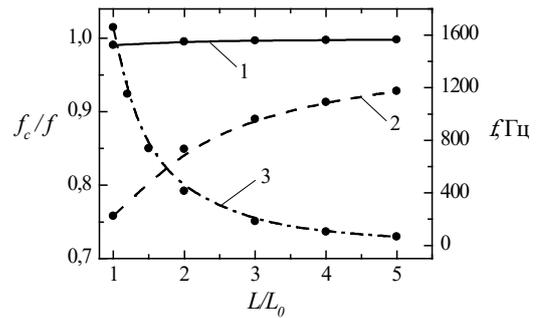


Рис. 8. Залежність зміни власної частоти першої форми коливань лопатки від відносної довжини лопатки при різній відносній глибині тріщини: (1) – $a/h=0,1$; (2) – $a/h=0,6$; (3) – $f(L/L_0)$ ($L_c=0$)

високу точність визначення власних частот коливань, такий підхід до практичної реалізації вібродіагностики пошкоджень лопатки може розглядатись як перспективний.

Висновки. Вібродіагностика лопаток турбін, заснована на зміні власних частот коливань, є достатньо чутливою для виявлення відносно невеликих тріщин, розмір яких не становить загрози для цілісності лопатки. Жорсткість лопатки впливає на чутливість такої вібродіагностики: чим жорсткіша лопатка, тим вищою є чутливість власних частот до наявності тріщини. З іншої сторони висока жорсткість лопатки ускладнює можливість використання вищих форм коливань для підвищення надійності діагностики тріщини, яка виникла в області лопатки по довжині, де напруження є відносно малими за першої форми коливань.

Подальша робота передбачає дослідження впливу тріщин, що виникають на кромках лопаток (точки А і С на рис. 2) на власні частоти коливань лопатки.

Список літератури:

1. Bovsunovsky A., Surace C. Non-linearities in the vibrations of elastic structures with a closing crack: A state of the art review // *Mechanical Systems and Signal Processing*. 2015. Vols. 62–63. P. 129–148. <https://doi.org/10.1016/j.ymssp.2015.01.021>.
2. Ismail F., Ibrahim A., Martin H.R. Identification of fatigue cracks from vibration testing // *J. of Sound and Vibration*. 1990. Vol.140(2). P. 305–317. [https://doi.org/10.1016/0022-460X\(90\)90530-D](https://doi.org/10.1016/0022-460X(90)90530-D)
3. Rytter A., Brincker R., Kirkegaard P.H. An experimental study of the modal parameters of a cantilever // *Fracture & Dynamics*, Paper No.37, Department of Building Technology and Structural Engineering, University of Aalborg, Denmark, 1992, 76 p.
4. Cheng S.M., Swamidass A.S.J., Wu X.J., Wallace W. Vibrational response of a beam with a breathing crack // *J. of Sound and Vibration*. 1999. Vol. 225(1). P. 201–208. <https://doi.org/10.1006/jsvi.1999.2275>
5. Rizos P.F., Aspragathos N., Dimarogonas A.D. Identification of crack location and magnitude in a cantilever beam from the vibration modes // *J. of Sound and Vibration*. 1990. Vol. 138(3). P. 381–388. [https://doi.org/10.1016/0022-460X\(90\)90593-0](https://doi.org/10.1016/0022-460X(90)90593-0)
6. Bovsunovsky A., Nosal O. Highly sensitive methods for vibration diagnostics of fatigue damage in structural elements of aircraft gas turbine engines // *Procedia Structural Integrity*. 2022. Vol. 35. P. 74–81. <https://doi.org/10.1016/j.prostr.2021.12.050>

7. Ballo I. Non-linear effects of vibration of a continuous transverse cracked slender shaft // *J. of Sound and Vibration*. 1998. Vol. 217(2). P. 321–333. <https://doi.org/10.1006/jsvi.1998.1809>
8. Ruotolo R., Surace C., Crespo P., Storer D. Harmonic analysis of the vibrations of a cantilevered beam with a closing crack // *Computers and Structures*. 1996. Vol. 61(6). P. 1057–1074. [https://doi.org/10.1016/0045-7949\(96\)00184-8](https://doi.org/10.1016/0045-7949(96)00184-8)
9. Tsyfansky S.L., Beresnevich V.I. Detection of fatigue cracks in flexible geometrically non-linear bars by vibration monitoring // *J. of Sound and Vibration*. 1998. Vol. 213(1). P. 159–168. <https://doi.org/10.1006/jsvi.1998.1502>
10. Afolabi D. An anti-resonance technique for detecting structural damage // *Proc. of the 5th IMAC*. 1987. P. 491–495.
11. Matveev V.V. Efficiency of the method of spectral vibrodiagnostics for fatigue damage of structural elements. Part 1. Longitudinal vibrations, analytical solution // *Strength of Materials*. 1997. Vol. 29. P. 561–572. <https://doi.org/10.1007/BF02767605>.
12. Ibrahim A., Ismail F., Martin H.K. Modelling of the dynamics of a continuous beam including nonlinear fatigue crack // *Int. J. of Analytical, Experimental Modal Analysis*. 1987. Vol.2(2). P. 76–82. [https://doi.org/10.1016/0022-460X\(90\)90530-D](https://doi.org/10.1016/0022-460X(90)90530-D)
13. Adams R.D., Cawley P., Pye C.J., Stone B.J. A vibration technique for non-destructively assessing the integrity of structures // *J. of Mechanical Engineering Science*. 1978. Vol. 20(2). P. 93–100. https://doi.org/10.1243/JMES_JOUR_1978_020_016_02
14. Ostachowicz W., Krawczuk M. Analysis of the effect of cracks on the natural frequencies of a cantilever beam // *J. of Sound and Vibration*. 1991. Vol. 150(2). P. 191–201. [https://doi.org/10.1016/0022-460X\(91\)90615-Q](https://doi.org/10.1016/0022-460X(91)90615-Q)
15. Kirshmer P.G. The effect of discontinuities on the natural frequency of beams // *Proc. ASTM*. 1944. Vol. 44. P. 897–904.
16. Thomson W.T. Vibration of Slender Bars With Discontinuities in Stiffness // *J. of Applied Mechanics*. 1949. Vol. 16. P. 203–207.
17. Petroski H.J. Simple static and dynamic models for the cracked elastic beam // *Int. J. of Fracture*. 1981. Vol.17(4). R71-R76. <https://doi.org/10.1007/BF00036201>
18. Shen M.-H. H., Pierre C. Free Vibrations of Beams with a Single-edge Crack // *J. of Sound and Vibration*. 1994. Vol. 170(2). P. 237–259. <https://doi.org/10.1006/jsvi.1994.1058>
19. Matveev V.V., Bovsunovsky A.P. Vibration-based diagnostics of fatigue damage of beam-like structures // *J. of Sound and Vibration*. 2002. Vol. 249(1). P. 23–40. <https://doi.org/10.1006/jsvi.2001.3816>
20. Stress intensity factors handbook. In 3 vol. Vol. 2. (Editor-in-chif Y. Murakami). The Society of Materials Sci., Japan and Pergamon Press, 1987.
21. Писаренко Г.С., Квітка О.Л., Уманський Е.С. Опір матеріалів. Київ: Вища школа, 2004. 655 с.
22. Bovsunovskii, A.P. Numerical study of vibrations of a nonlinear mechanical system simulating a cracked body // *Strength of Materials*. 1999. Vol. 31. P. 571–581. <https://doi.org/10.1007/BF02510893>

Bovsunovsky A.P., Nosal O.Yu. FEATURES OF VIBRATION DIAGNOSTICS OF TURBINE BLADES DAMAGE

The paper is devoted to the investigation of the turbine blades which are subjected to intense mechanical (static and dynamic) and thermal loads in a corrosive environment. The consequence of such loading is the gradual accumulation of diffuse fatigue damage, which eventually becomes localized one as a fatigue crack. When the crack reaches a critical size, there is a danger of blade destruction with catastrophic consequences for the entire turbine. Timely detection of blade damage is possible at the stage of turbine repair using vibration diagnostics.

Aim. *The aim of the work is to create an analytical approach that allows modeling the vibration of turbine blade with a fatigue crack, as well as the study of the influence of the crack parameters and the geometric parameters of the blade on natural frequencies of the blade to assess the effectiveness of vibration diagnostics of damage.*

Methods. *The classical theory of vibration is used to solve the problem. The effect of surface crack on the compliance of blade is determined by the fracture mechanics approaches.*

Results. *The paper presents the results of the study on the effect of a surface transverse crack on the natural frequencies of turbine blade. There were determined as a result of experimental and analytical investigation the effect of crack parameters (crack size and location) and blade geometrical characteristics on the natural frequencies of blade.*

Conclusions. *It is shown in the work that the vibration diagnostics of turbine blades, based on the change in natural frequencies, is sensitive enough to detect relatively small cracks, the size of which does not pose a threat to the integrity of blades. The stiffness of blade affects the sensitivity of such vibration diagnostics: the stiffer the blade, the higher the sensitivity of natural frequencies to the presence of a crack.*

Key words: *vibration diagnostics, turbine blades, natural frequencies, crack.*

Бовсуновський О.А.

Інститут проблем міцності імені Г.С. Писаренка Національної академії наук України

Носаль О.Ю.

Національний технічний університет України

«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

ДІАГНОСТИКА ПОШКОДЖЕННЯ РОТОРІВ ТУРБІН НА СТАДІЇ РЕМОНТУ

Конструктивні елементи багатьох складових енергетичного обладнання електричних станцій при експлуатації зазнають інтенсивних механічних (статичних і динамічних) і термічних навантажень у корозійно-агресивному середовищі. Особливо значного навантаження зазнають ротори турбін і турбогенераторів. Наслідком такого навантаження є накопичення розсіяного втомного пошкодження, яке локалізується у вигляді тріщини втоми. При досягненні тріщиною критичного розміру виникає небезпека руйнування ротора з катастрофічними наслідками для всієї турбіни. Тому діагностування пошкодження ротора докритичного розміру є важливою практичною проблемою.

Мета. Метою роботи є створення розрахункової моделі для визначення зміни власної частоти коливань ротора при виникненні в ньому крайової тріщини за різної її орієнтації відносно осі обертання, а також розробка методики діагностування тріщини в роторі турбіни, ґрунтуючись на вібраційних дослідженнях ротора на стадії ремонту турбіни.

Методи. Для вирішення задачі використано методи теорії коливань тіл з локальною змінюваною піддатливістю, зумовленою тріщиною. Вплив крайової тріщини на піддатливість ротора визначено методами механіки руйнування.

Результати. В роботі представлено результати дослідження впливу поверхневої поперечної тріщини на власну частоту першої форми коливань ротора турбіни за різної орієнтації тріщини відносно осі обертання, а також впливу місцеположення тріщини і жорсткості ротора на чутливість зміни власної частоти до пошкодження. Розроблено методику вібраційної діагностики пошкодження ротора турбіни на стадії її ремонту.

Висновки. Розроблено аналітично-розрахункову модель для визначення власних частот поперечних коливань ротора з крайовою тріщиною за різної орієнтації тріщини відносно осі обертання. Запропоновано методику вібраційної діагностики пошкодження ротора турбіни на основі відносної зміни власної частоти першої форми поперечних коливань ротора на стадії ремонту турбіни при послідовному повороті ротора на певний кут. Запропонована методика вібраційної діагностики роторів турбін є достатньо чутливою для виявлення відносно невеликих тріщин, розмір яких не становить загрози для цілісності ротора.

Ключові слова: вібраційні діагностика, ротор турбіни, власні частоти, тріщина втоми.

Постановка проблеми. Конструктивні елементи багатьох складових енергетичного обладнання електричних станцій при експлуатації зазнають інтенсивних механічних (статичних і динамічних) і термічних навантажень у корозійно-агресивному середовищі. Особливо значного навантаження зазнають ротори турбін і турбогенераторів. Наслідком такого навантаження є накопичення розсіяного втомного пошкодження, яке локалізується у вигляді тріщини втоми. При досягненні тріщиною критичного розміру виникає небезпека руйнування ротора з катастрофічними наслідками для всієї турбіни. Тому діагностування пошкодження ротора докритичного

розміру (тобто такого, що не загрожує його цілісності) є важливою практичною проблемою.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Проблема забезпечення довговічності і гарантування ресурсних показників відповідальних конструктивних елементів парових турбін та турбогенераторів є важливою проблемою сучасної енергетики України. З кожним роком ця проблема стає дедалі гострішою з вичерпанням ресурсу енергогенеруючого обладнання і потребує невідкладного вирішення [1].

Одними з найбільш небезпечними для цілісності конструктивних елементів парових турбін є динамічні режими навантаження, що мають

місце, наприклад, при проходженні через критичні швидкості обертання валу турбіни (поперечні коливання), а також при позаштатних режимах турбогенератора (крутильні коливання) [2]. При таких режимах навантаження механічні напруження на окремих ділянках роторів турбіни можуть перевищувати границю втоми роторної сталі, що невідворотно призводить до її втомного пошкодження [3]. Крім того, конструктивні особливості роторів турбін, а саме численні галтелі і теплові канавки, що є концентраторами напружень, є ще однією причиною зародження та росту тріщин [4].

Про актуальність проблеми суттєвого втомного пошкодження роторів парових турбін свідчать численні роботи. Зокрема, катастрофічне руйнування ротора середнього тиску парової турбіни потужністю 225 МВт сталося через розвиток тріщини втомі протягом декількох років [5]. Повне руйнування турбіни потужністю 300 МВт також стало результатом тривалого розвитку тріщин втомі, які не були виявлені під час капітального ремонту турбіни [6].

Вчасне діагностування доволі значної тріщини у роторі турбіни на електростанції Бесат дозволив уникнути катастрофічного руйнування парової турбіни [7]. Велика кільцева тріщина була виявлена у роторі турбіни потужністю 60 МВт ТЕС після 10 років експлуатації [8]. Тріщина знаходилась в області ротора з відносно невеликим діаметром і досягала 75% поперечного перерізу (рис. 1). Причиною виникнення тріщини було названо концентрацію механічних напружень і термічні напруження, які виникають в результаті підготовки турбіни до пуску.

Як видно з рис. 1, кільцева тріщина в роторі з низьковуглецевої низьколегованої сталі в реаль-

них умовах експлуатації може досягати значних розмірів, зберігаючи при цьому працездатний стан.

Діагностування тріщин в конструктивних елементах парової турбіни в процесі експлуатації є складною і досі не вирішеною проблемою [9]. Найбільшу проблему становить недоступність елементів турбіни для діагностики. Перспективним шляхом її вирішення є застосування різних діагностичних методів на стадії капітального ремонту турбіни, коли відбувається повне розбирання турбіни.

Використання локальних неруйнівних методів діагностики пошкоджень (рентгеноскопія, акустична емісія тощо) є трудомістким, потребує спеціального обладнання і висококваліфікованого персоналу. В той же час вібраційна діагностика пошкоджень є інтегральним методом діагностики, тобто дозволяє оцінити стан об'єкта діагностики в цілому в результаті відносно короткотривалих і відносно нескладних тестів для визначення його динамічних характеристик [10]. Основною перевагою вібраційної діагностики над локальними методами є те, що вона потребує значно менше часу для діагностування пошкодження у великогабаритних конструкціях.

Вібраційна діагностика пошкоджень ґрунтується на ідеї, що динамічні характеристики непошкодженого і пошкодженого тіла відрізняються. Зміна динамічних характеристик, зумовлена впливом пошкодження на жорсткість (піддатливість) об'єкта діагностики, застосовується для діагностування тріщин втомі, а також для визначення її параметрів (розмірів та розташування) [9]. В якості інформаційних характеристик при застосуванні вібраційної діагностики використовують зміну власних частот і форм коливань

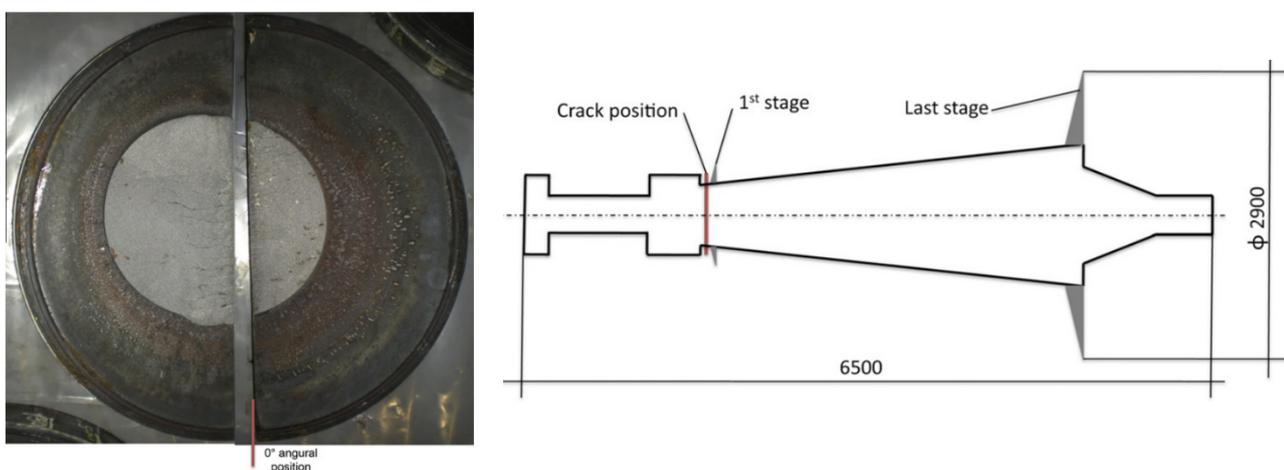


Рис. 1. Кільцева тріщина в роторі турбіни агрегату 60 МВт ТЕС [8]

об'єкта діагностики, характеристик демпфування, виникнення нелінійних ефектів, зміщення антирезонансних частот тощо. Кожен з цих методів має свої переваги і недоліки, але жоден з них не є універсальним.

Точність розрахункової моделі для передбачення впливу тріщини на власні частоти коливань ротора визначається вибором моделі тріщини. Така модель повинна достатньо точно відображати вплив тріщини на піддатливість ротора. Порівняльний аналіз різних моделей тріщини дозволив зробити висновок про те, що найбільш точною і зручною для практичного використання є модель, заснована на використанні підходів механіки руйнування [11]. Такий підхід дозволяє відносно просто розрахувати зміну піддатливості ділянки тіла, зумовленої появою і ростом тріщини.

Постановка завдання. Метою роботи є створення аналітично-розрахункової моделі ротора турбіни з тріщиною і розробка на її основі методики вібродіагностики ротора на стадії ремонту турбіни, використовуючи в якості вібраційної характеристики пошкодження зміну власних частот коливань ротора.

Виклад основного матеріалу дослідження. Модель ротора турбіни з тріщиною для розрахунку власних частот. Аналітична модель поперечних коливань ротора турбіни (рис. 2) з крайовою поперечною тріщиною побудована на основі рішення диференціального рівняння, що описує вільні поперечні коливання ротора на двох опорах без урахування демпфування [11]

$$\frac{\partial^4 y(x,t)}{\partial x^4} + \frac{\rho F}{EI} \frac{\partial^2 y(x,t)}{\partial t^2} = 0, \quad (1)$$

де E і ρ – модуль пружності і густина матеріалу ротора, відповідно; I і F – осьовий момент інерції і площа поперечного перерізу ротора.

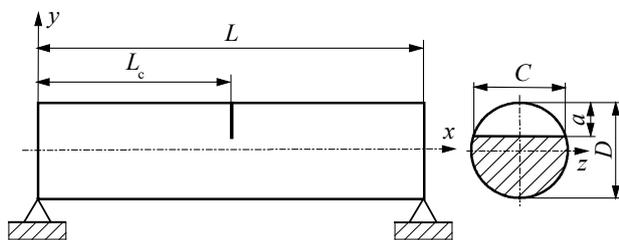


Рис. 2. Ротор на двох опорах з крайовою поперечною тріщиною

Коливання ротора, коли тріщина закрита, описується тим же рівнянням, що і ротора без тріщини, оскільки жорсткість ротора в обох випадках є однаковою

$$y(x,t) = \sum_{i=1}^{\infty} w_i(x) (P_i \sin \omega_i t + R_i \cos \omega_i t), \quad (2)$$

де $w_i(x)$, ω_i – відповідно власні форми та частоти коливань ротора; P_i , R_i – коефіцієнти, що підлягають визначенню; i – номер форми коливань.

Коли тріщина відкрита під дією навантаження (механічного чи термічного), вона моделюється пружним шарніром, що має деяку піддатливість. Тоді коливання ротора з відкритою тріщиною описуються рівнянням

$$y_{oj}(x,t) = \sum_{i=1}^{\infty} w_{ij}(x) (P_{oi} \sin \omega_{oi} t + R_{oi} \cos \omega_{oi} t), \quad (3)$$

де $w_{ij}(x)$ – власні форми коливань ротора на j -тій ділянці по довжині ($j=1,2$ – ділянки зліва і справа відносно тріщини); ω_{oi} – кутові частоти коливань ротора з відкритою тріщиною; P_{oi} , R_{oi} – коефіцієнти, що підлягають визначенню.

Власні форми коливань ротора на j -тій ділянці валу визначаються через функції Крилова S , T , U , V

$$w_{ij}(x) = A_{ij} S(k_{oi} x) + B_{ij} T(k_{oi} x) + C_{ij} U(k_{oi} x) + D_{ij} V(k_{oi} x).$$

Крайові умови для переміщення $w_{ij}(x)$ та згинального моменту $M_{ij}(x)$, а також умови сполучення ділянок 1 і 2 ротора, розділених тріщиною, мають вигляд

$$w_{i1}(0) = 0; \quad w_{i2}(L) = 0; \quad M_{i1}(0) = 0, \quad M_{i2}(L) = 0;$$

$$w_{i1}(L_c) = w_{i2}(L_c); \quad \theta_{i1}(L_c) - \theta_{i2}(L_c) = \kappa_c M_{i1}(L_c);$$

$$M_{i1}(L_c) = M_{i2}(L_c); \quad Q_{i1}(L_c) = Q_{i2}(L_c);$$

де L – довжина ротора; L_c – відстань від лівого краю валу до перерізу з тріщиною; κ_c – зміна піддатливості перерізу з тріщиною; $\theta_{ij}(x)$ – кут повороту поперечного перерізу; $\theta_{ij}(x)$ – поперечна сила.

З врахуванням крайових умов частотне рівняння, що визначає власні частоти коливань ротора з відкритою тріщиною має наступний вигляд

$$\begin{vmatrix} 0 & 0 & S(\phi_i) & T(\phi_i) & U(\phi_i) & V(\phi_i) \\ 0 & 0 & U(\phi_i) & V(\phi_i) & S(\phi_i) & T(\phi_i) \\ T(\psi_i) & V(\psi_i) & -S(\psi_i) & -T(\psi_i) & -U(\psi_i) & -V(\psi_i) \\ -S(\psi_i) - \kappa_c V(\psi_i) & -U(\psi_i) - \kappa_c T(\psi_i) & V(\psi_i) & S(\psi_i) & T(\psi_i) & U(\psi_i) \\ V(\psi_i) & T(\psi_i) & -U(\psi_i) & -V(\psi_i) & -S(\psi_i) & -T(\psi_i) \\ U(\psi_i) & S(\psi_i) & -T(\psi_i) & -U(\psi_i) & -V(\psi_i) & -S(\psi_i) \end{vmatrix} = 0. \quad (4)$$

де $\phi_i = k_{oi} L$; $\psi_i = L_c \phi_i / L$; $r_o = EI \kappa_c \phi_i / L$; $k_{oi}^4 = \omega_{oi}^2 \rho F / EI$.

Зміна піддатливості перерізу з тріщиною визначалась енергетичним методом, який ґрунтується на порівнянні зміни енергії деформації тіла при виникненні в ньому тріщини, визначеної на основі підходів механіки руйнування і на основі класичної механіки [11].

Для крайової тріщини нормального відриву з прямим фронтом (рис. 2) за умови плоского напруженого стану зміна енергії деформації валу визначається наступним рівнянням

$$\Delta U = \frac{1}{E} \int_0^{C_a} \int_0^C K^2 d a d z, \quad (5)$$

де K_I – коефіцієнт інтенсивності напружень (КІН); a – глибина тріщини; C – довжина фронту тріщини, яка в даному випадку визначається за формулою

$$C = 2\sqrt{a(D-a)}, \quad (6)$$

в якій D – діаметр ротора.

Розподіл КІН вздовж фронту тріщини визначається наступним рівнянням

$$K_I = \sigma_c \sqrt{\pi a} F_I(\gamma) F_I(z), \quad (7)$$

де σ_c – напруження в околі тріщини; функції $F_I(\gamma)$ і $F_I(z)$, які визначають залежність КІН від відносної глибини тріщини ($\gamma=a/D$) і його розподіл вздовж фронту тріщини, відповідно, взяті з роботи [12].

Функції $F_I(z)$ були отримані для різних кутів повороту валу відносно осі обертання θ (рис. 3), від якого залежить ступінь розкриття тріщини і розподіл КІН вздовж її фронту для відносної глибини тріщини $\gamma=0,25$. Чорним кольором на рис. 3 демонструється розкрита частина тріщини. Таким чином

$$F_I(\gamma) = 0,99833 - 0,59722\gamma - 1,16667\gamma^2 + 6,38889\gamma^3; (\gamma \leq 0,5) \quad (8)$$

$$F_I(z) = 0,74846 + 0,52557 \frac{z}{C} - 0,52557 \left(\frac{z}{C}\right)^2; (\theta=0^\circ) \quad (9)$$

$$F_I(z) = 0,65369 + 0,37211 \frac{z}{C} - 1,06632 \left(\frac{z}{C}\right)^2 + 0,34497 \left(\frac{z}{C}\right)^3; (\theta=45^\circ) \quad (10)$$

$$F_I(z) = 0,21944 - 0,32109 \frac{z}{C}; (\theta=90^\circ) \quad (11)$$

$$F_I(z) \approx 0. (\theta=135^\circ) \quad (12)$$

Оскільки при куті повороту $\theta=90^\circ$ тріщина є частково закритою, інтегрування згідно з рівнянням (5) виконувалось по довжині тріщини 0,7C. З врахуванням рівнянь (8)–(12) зміна енергії деформації валу, зумовлена тріщиною, має вигляд

$$\Delta U = \frac{2}{E} \sigma_c^2 \pi a^2 C \xi(\gamma) \chi, \quad (13)$$

де

$$\xi(\gamma) = 0,99666 - 0,59622\gamma - 0,65759\gamma^2 + 3,53749\gamma^3 - 1,25401\gamma^4 - 2,48458\gamma^5 + 5,83113\gamma^6;$$

$$\chi=0,79517 (\theta=0^\circ); \chi=0,33951 (\theta=45^\circ);$$

$$\chi=0,00844 (\theta=90^\circ); \chi=0 (\theta=135^\circ).$$

З іншого боку цю ж енергію можна визначити через зміну піддатливості перерізу при виникненні в ньому тріщини (κ_c), а саме

$$\Delta U = 0,5\kappa_c M^2, \quad (14)$$

де M – згинальний момент у перерізі з тріщиною.

З рівнянь (13) і (14) отримуємо

$$\kappa_c = \frac{2}{E W_x^2} \pi a^2 C \xi(\gamma) \chi, \quad (15)$$

де W_x – осьовий момент опору поперечного перерізу валу.

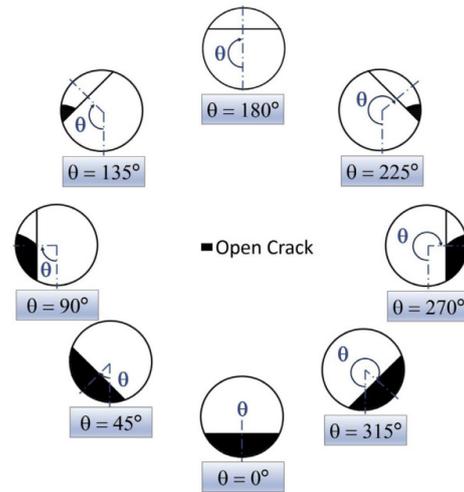


Рис. 3. Розкриття тріщини при повороті валу під дією його ваги [12]

Рішення частотного рівняння (4) дає змогу отримати власні частоти коливань валу з відкритою тріщиною. Такий стан тріщини є можливим за значення асиметрії циклу, яка перевищує амплітуду коливань. Тобто, якщо статичні напруження згину валу від його власної ваги будуть перевищувати амплітуду коливань, тріщина буде залишатись відкритою.

Зміна власних частот коливань об'єкту діагностики з відкритою тріщиною перевищує таку у випадку тріщини, що закривається [11]. Тому з точки зору підвищення чутливості вібродіагностики тріщин у валах турбіни, заснованої на зміні власних частот, необхідно збуджувати коливання з невеликою амплітудою, щоб запобігти закриттю тріщини при коливаннях.

Далі розглядається саме такий випадок і досліджується вплив параметрів тріщини і геометричних характеристик валів турбіни на власні частоти коливань валу з відкритою тріщиною.

Вібраційна діагностика роторів турбіни з поперечною тріщиною на основі зміни власних частот. Аналітичні дослідження впливу параметрів тріщини і геометричних характеристик роторів на власну частоту першої форми коливань були виконані стосовно роторів високого (РВТ), середнього (РСТ) і низького (РНТ) турбіни К-200-130 (рис. 4), виготовлених з сталі 25Х1МФА. В розрахунках було прийнято $E=200$ ГПа; $\rho=7800$ кг/м³.

При вібраційному діагностуванні ротора турбіни розкриття тріщини відбувається під дією власної ваги ротора. Максимальні напруження згину при цьому будуть мати місце посередині ротора і визначити їх можна за наступною формулою

$$\sigma_{max}(L/2) = \frac{2dL^2 g \rho}{D^2 - d^2}, \quad (16)$$

де d – діаметр технологічного каналу ротора; g – прискорення вільного падіння.

Так для РВТ це напруження складає 1,9 МПа. Таким чином, якщо амплітуда коливань при діагностичних випробуваннях не перевищуватиме це значення, тріщина залишатиметься відкритою. В іншому випадку тріщина буде періодично закриватись.

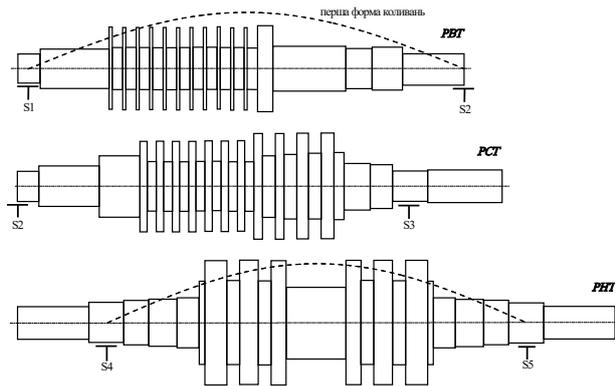


Рис. 4. Ротори турбіни К-200-130

Рішення частотного рівняння (4) дає змогу отримати власні частоти коливань ротора з відкритою тріщиною. Власні частоти коливань ротора з тріщиною, що закривається, можна визначити, знаючи власну частоту ротора без тріщини (f) і ротора з відкритою тріщиною (f_o), а саме

$$f_c = \frac{2ff_o}{f + f_o}. \quad (17)$$

Треба зауважити, використання рівнянь (1)–(4) не дає змогу точно прогнозувати власні частоти коливань ступінчастих роторів. Але зважаючи на те, що інформаційною характеристикою пошкодження, яка використовується в роботі, є відносна величина, а саме f_c/f (або f_c/f_o), на неї визначальний вплив складає не погрішність визначення абсолютного значення частоти, бо вона є однаковою для значення частоти у чисельнику і знаменнику, а точність визначення зміни піддатливості перерізу з тріщиною відповідно до рівняння (15), яка була підтверджена в багатьох експериментальних дослідженнях [9].

Діагностика проводиться в процесі ремонту турбіни, коли ротори знаходяться поза турбіною і відокремлені один від одного. Кожен з них розташовується на двох опорах, на яких можливе обертання ротора навколо своєї осі. Збудження коливань відбувається за допомогою електродинамічного вібратора (рис. 5). Зусилля від вібра-

тора до ротора передається через напівжорсткий шток. Частота сигналу, який подається на вібратор через підсилювач потужності, задається генератором сигналу. Частота сигналу плавно змінюється в околі власної частоти першої форми коливань ротора. Резонансна частота визначається за максимальною амплітудою коливань ротора. Вимірювання амплітудних значень поперечних коливань ротора у вертикальній площині здійснюється за допомогою акселерометра.

Після повороту ротора на певний кут (крок вимірювання) цикл визначення резонансної частоти повторюється. При цьому загальний кут повороту ротора не перевищує 180° .

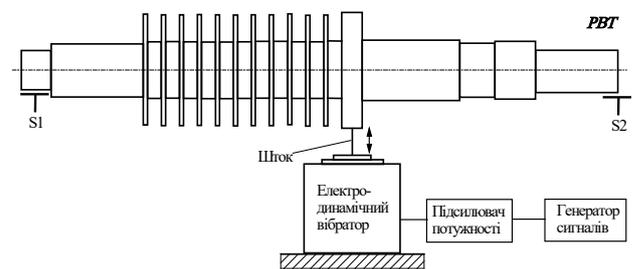


Рис. 5. Блок-схема діагностичної установки роторів турбіни

Оскільки передбачається, що амплітуда коливань не перевищує значення статичного прогину ротора від його ваги, тріщина при вібраційному діагностуванні залишається відкритою. В цьому випадку в залежності від орієнтації тріщини відносно вертикальної площини при повороті ротора на кут θ з кроком 45° розкриття тріщини поступово змінюється, як це показано на рис. 3, від повністю закритого ($\theta=180^\circ$) до повністю відкритого ($\theta=0^\circ$) стану.

Рис. 6 демонструє, яким чином змінюється власна частота коливань роторів в залежності від ступеня розкриття тріщини. Очікувано, що найбільша зміна власної частоти має місце при найбільшому розкритті тріщини, яке має місце при $\theta=0^\circ$. Загалом діапазон зміни власної частоти, який можна отримати в результаті чотирьох окремих тестів ротора при послідовному покроковому повороті його на 45° , є достатнім для надійного діагностування тріщини з відносною глибиною $a/D=0,25$. Більше того, в результаті таких тестів визначається також орієнтація тріщини відносно вертикальної площини: досягнення зміною власної частоти найбільшого значення означає, що кут, під яким розташована тріщина становить $\theta=0^\circ$.

З рис. 6 також очевидно, що чутливість вібродіагностики тріщин в роторах турбіни до деякої міри

залежить від їхньої жорсткості. Так найбільша зміна власної частоти РВТ (найбільший діаметр $D=0,44$ м) досягає 3,5%, в той час як така зміна для РСТ (найбільший діаметр $D=0,65$ м) і РНТ (найбільший діаметр $D=0,76$ м) – 5,0 і 5,8%, відповідно.

Зазвичай, особливістю вібродіагностики пошкодження, заснованої на зміні власних частот коливань, є необхідність початкових даних про власну частоту (чи частоти) коливань об'єкта діагностики у непошкодженому стані, відносно якої визначається зміна частоти, зумовлена тріщиною. Методика вібродіагностики, результати якої наведені на рис. 6, не потребує таких даних, що є її суттєвою перевагою над традиційними методами.

На рис. 7 наведені залежності зміни власної частоти роторів від розміру крайової тріщини для випадку її повного розкриття $\theta=0^\circ$, які дозволяють оцінити чутливість вібродіагностики тріщин на основі зміни власних частот. Так найбільша зміна власної частоти роторів, зумовлена тріщиною з відносними розмірами $a/D=0,1$ не перевищує 1%, що може бути недостатнім для надійної діагностики. В той же час тріщина з відносним розміром $a/D=0,2$ зумовлює зміну власної частоти РВТ, РСТ і РНТ до 2,2, 3,2 і 3,6%, відповідно. Такі зміни частоти надійно фіксуються сучасними засобами вимірювання.

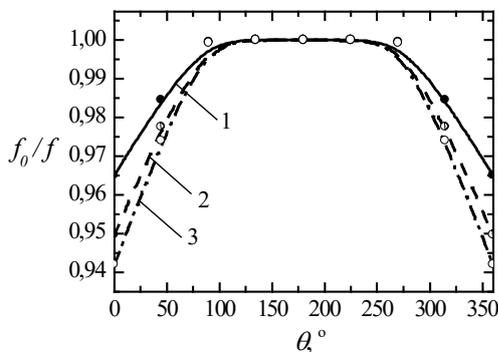


Рис. 6. Залежність відносної зміни власної частоти першої форми коливань РВТ (1), РСТ (2) і РНТ (3) від кута повороту ротора з відкритою тріщиною відносно осі обертання ($a/D=0,25$; $L_c/L=0,5$)

Аналіз залежностей, наведених на рис. 7, демонструє вплив жорсткості роторів на чутливість вібродіагностики. Так при збільшенні діаметра ротора на 48% чутливість вібродіагностики збільшується на 33%, а при збільшенні діаметра на 72% – на 48%, тобто чутливість вібродіагностики збільшується дещо повільніше, ніж діаметр роторів. Наприклад, зміна власної частоти роторів з діаметром $D=0,44$, $0,65$ і $0,76$ м, зумовлена тріщиною з відносним розміром $a/D=0,5$ досягає, відповідно 14,6, 19,4 і 21,6%.

Залежності, продемонстровані на рис. 6 і 7, отримані для випадку, коли тріщина знаходиться посередині ротора ($L_c/L=0,5$), тобто в найбільш напруженому перерізі ротора при поперечних коливаннях за першою формою. Внаслідок різних причин (концентратор напружень, дефект матеріалу, пошкодження поверхні тощо) тріщина може виникнути і в інших перерізах ротора по довжині. Вплив місцезнаходження тріщини на власну частоту першої форми коливань ротора продемонстровано на рис. 8. Як видно, він є тим меншим, чим нижчим є відносний рівень напружень у перерізі з тріщиною. Так тріщина, яка знаходиться посередині ротора змінює власну частоту коливань у декілька разів інтенсивніше, ніж та, що виникла недалеко від опори. Область ротора по довжині, де вібродіагностика залишається ефективною, знаходиться в діапазоні $0,1L \dots 0,9L$, що є прийнятним, враховуючи, що тріщини зазвичай утворюються у високонапружених частинах конструкції.

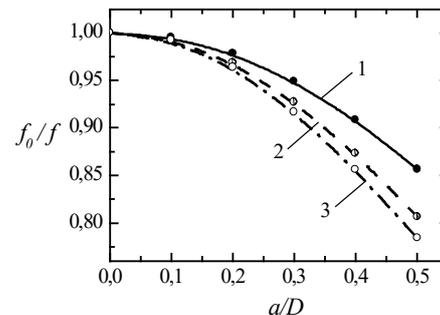


Рис. 7. Залежність відносної зміни власної частоти першої форми коливань РВТ (1), РСТ (2) і РНТ (3) від відносної глибини тріщин ($\theta=0^\circ$; $L_c/L=0,5$)

Для надійної діагностики тріщин по всій довжині ротора можна використовувати відносну зміну декількох власних частот. В цьому випадку переріз з тріщиною хоча б для однієї форми коливань буде знаходитись у відносно більш напруженій області ротора, що зумовить більш суттєву зміну частоти. З іншого боку, якщо переріз з тріщиною знаходиться в околі вузла напружень, в якому напруження при коливаннях за певною формою дорівнюють нулю, власна частота цієї форми коливань не буде змінюватись за будь-якого розміру тріщини, що є суттєвим недоліком вібродіагностики пошкоджень, заснованої на зміні власних частот. Саме тому використання декількох форм коливань ротора сприяє підвищенню надійності такої вібродіагностики тріщин, але в той же час суттєво ускладнює методику вібродіагностики.

Ще один фактор, який суттєво впливає на чутливість власних частот коливань ротора до наяв-

ності тріщини – це його жорсткість. Жорсткість ротора змінювали за рахунок зміни його довжини.

На рис. 9 показано вплив відносної довжини ротора на власну частоту першої форми його коливань. Тут прийнято, що $L_0=4,5$ м. Якщо для найкоротшого (а, отже, найжорсткішого) ротора найбільша відносна зміна частоти при $a/D=0,5$ досягає 25%, то збільшення довжини ротора в чотири рази зменшує цю зміну до 8%. Тобто чутливість власної частоти коливань ротора до наявності тріщини зменшується майже в тій же пропорції, що і жорсткість ротора.

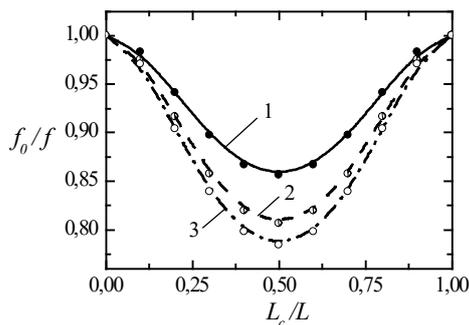


Рис. 8. Вплив місцезнаходження тріщини по довжині РВТ (1), РСТ (2) і РНТ (3) на власну частоту першої форми коливань ($a/D=0,5$)

Для тріщин іншого розміру відносна зміна чутливості вібродіагностики при видовженні ротора не змінюється. В той же час абсолютних значень зміни власної частоти коливань ротора (до 1%), зумовлених невеликою тріщиною ($a/D=0,1$) може бути недостатніми для надійної діагностики пошкодження.

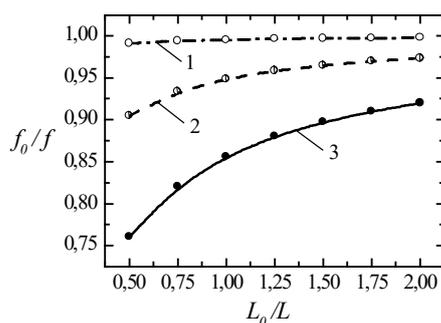


Рис. 9. Залежність зміни власної частоти першої форми коливань ротора від його відносної довжини при різних відносних розмірах тріщини: (1) – $a/D=0,1$; (2) – $a/D=0,3$; (3) – $a/D=0,5$ ($L_c/L=0,5$)

В той же час пропорційна зміна розмірів поперечного перерізу і довжини ротора майже не призводить до зміни чутливості вібродіагностики пошкодження ротора, заснованої на зміні власних частот (деякий вплив справляє технологічний діа-

метр). Так якщо тріщина з параметрами $a/D=0,5$ і $L_c/L=0,5$ призводить до відносної зміни власної частоти коливань ротора довжиною $L_0=4,5$ на рівні $f_0/f=0,8563$, то збільшення довжини ротора вдвічі призводить до відносної зміни власної частоти коливань на рівні $f_0/f=0,8567$, тобто різниця не перевищує 0,05%.

Висновки. Розроблено аналітично-розрахункову модель для визначення власних частот поперечних коливань ротора з крайовою тріщиною за різної орієнтації тріщини відносно осі обертання. Вплив тріщини на піддатливість ротора визначається апробованими методами механіки руйнування.

Запропоновано методику вібраційної діагностики пошкодження ротора турбіни на основі відносної зміни власної частоти першої форми поперечних коливань ротора на стадії ремонту турбіни при послідовному повороті ротора на певний кут (крок вимірювання). За кроку вимірювання у 45° достатньо чотирьох тестів для надійного діагностування тріщини з відносною глибиною $a/D=0,25$. Чим меншим є крок вимірювання, тим більше циклів визначення резонансної частоти ротора необхідно виконати. Вплив кількості циклів вимірювання на чутливість вібродіагностики є предметом окремого дослідження.

Перевагою запропонованої методики вібраційної діагностики пошкодження над традиційними методиками є те, що вона не потребує початкових даних про власну частоту (чи частоти) коливань об'єкта діагностики у непошкодженому стані, відносно якої визначається зміна частоти, зумовлена тріщиною.

Запропонована методика вібраційної діагностики роторів турбін, заснована на зміні власних частот коливань ротора при послідовному його повороті на певний кут, є достатньо чутливою для виявлення відносно невеликих тріщин, розмір яких не становить загрози для цілісності ротора.

Чутливість запропонованої методики вібраційної діагностики залежить від місцеположення тріщини по довжині ротора і його жорсткості. Так область ротора по довжині, де вібродіагностика тріщин при використанні першої форми коливань ротора залишається ефективною, знаходиться в діапазоні $0,1L \dots 0,9L$, що є прийнятним, враховуючи, що тріщини зазвичай утворюються у високонапружених частинах конструкції. Жорсткість ротора впливає на чутливість вібродіагностики пошкодження наступним чином: чим жорсткішим є ротор, тим вищою є чутливість зміни власних частот до наявності тріщини. В той же час вона залишається достатньою для виявлення тріщин докритичного розміру навіть у найменш жорсткому з розглянутих роторів.

Список літератури:

1. Черноусенко О.Ю., Риндюк Д.В., Пешко В.А. Оцінка залишкового ресурсу та подовження експлуатації парових турбін великої потужності (частина 3). Монографія для науковців та докторів філософії за спеціальністю 144 «Теплоенергетика». К.: НТУУ «КПІ Ім. Ігоря Сікорського», 2020. 297 с.
2. Bovsunovskii A.P. Asynchronous connection of a turbine generator to the mains as a factor of fatigue damage of steam turbine shafting // *Strength of Materials*. 2014. Vol. 46(6). P. 810–819. <https://doi.org/10.1007/s11223-014-9615-x>
3. Troshchenko V.T., Khamaza L.A. Fatigue fracture stages of metals and alloys and stage-to-stage transition criteria // *Strength of Materials*. 2018. Vol. 50(3). P. 529–539. <https://doi.org/10.1007/s11223-018-9998-1>
4. Кострикін В. О., Сухінін В. П., Шубенко О. Л. Конструкція і розрахунки на міцність елементів парових турбін. Харків: ЧП „КиК”, 2006. 136 с.
5. Dorfman L.S. and Trubelja M. Torsional monitoring of turbine-generators for incipient failure detection // *Proc. of the sixth EPRI steam turbine/generator workshop*, St. Luis, Missouri; August. 1999. P. 1–6.
6. Bovsunovskii A.P. Torsional vibration in steam turbine shafting in turbogenerator abnormal modes of operation // *Strength of Materials*. 2012. Vol. 44(2). P. 177–186. <https://doi.org/10.1007/s11223-012-9370-9>
7. Majid Yadavar Nikraves, Mojtaba Meidan Sharaf. Failure of a steam turbine rotor due to circumferential crack growth influenced by temperature and steady torsion // *Engineering Failure Analysis*. 2016. Vol. 66. P. 296–311. <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2016.03.020>
8. Barella S., Bellogini M., Boniardi M., Cincera S. Failure analysis of a steam turbine rotor // *Engineering Failure Analysis*. 2011. Vol. 18(6). P. 1511–1519. <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2011.05.006>
9. Bovsunovsky A., Surace C. Non-linearities in the vibrations of elastic structures with a closing crack: A state of the art review // *Mechanical Systems and Signal Processing*. 2015. Vols. 62–63. P. 129–148. <https://doi.org/10.1016/j.ymsp.2015.01.021>.
10. Ewins D.J., *Modal Testing: Theory, Practice and Application*, England: Wiley, 2000. Second Edition.
11. Matveev V.V., Bovsunovsky A.P. Vibration-based diagnostics of fatigue damage of beam-like structures // *J. of Sound and Vibration*. 2002. Vol. 249(1). P. 23–40. <https://doi.org/10.1006/jsvi.2001.3816>
12. Muñoz-Abella, B., Rubio, L., Rubio, P. (2014). Study of the Stress Intensity Factor of an Unbalanced Rotating Cracked Shaft. In: Petuya, V., Pinto, C., Lovasz, EC. (eds) *New Advances in Mechanisms, Transmissions and Applications. Mechanisms and Machine Science*, vol 17. Springer, Dordrecht. https://doi.org/10.1007/978-94-007-7485-8_49

Bovsunovskyi O.A., Nosal O.Yu. DIAGNOSTICS OF TURBINE ROTORS DAMAGE AT THE REPAIR STAGE

The structural elements of many components of power stations energy equipment are subjected to the intense mechanical (static and dynamic) and thermal loading in a corrosive and aggressive environment during operation. The rotors of turbines and turbogenerators are subjected to a particularly significant load. The consequence of such a load is the accumulation of scattered fatigue damage, which is localized in the form of a fatigue crack. When the crack reaches a critical size, there is a danger of rotor destruction with catastrophic consequences for the entire turbine. Therefore, the diagnosis of subcritical rotor damage is an important practical problem.

Aim. The aim of the work is to create a calculation model for the determination of a rotor natural frequency change when an edge crack occurs in it at different orientations relative to the axis of rotation, as well as the development of a technique for the diagnostics of crack in a turbine rotor, based on vibration tests of the rotor at the stage of turbine repair.

Methods. To solve the problem, the methods of the theory of vibrations for bodies with local variable compliance caused by a crack are used. The influence of the edge crack on the compliance of rotor is determined by the methods of fracture mechanics.

Results. The paper presents the results of the study on the effect of surface transverse crack on the natural frequency of the turbine rotor first mode shape at different orientations of the crack relative to the axis of rotation, as well as the effect of the crack location and the stiffness of the rotor on the sensitivity of the natural frequency change to the damage. A method of vibration diagnostics of turbine rotor damage at the stage of its repair has been developed.

Conclusions. An analytical and computational model has been developed to determine the natural frequencies of transverse vibrations of a rotor with an edge crack at different its orientation relative to the axis of rotation. A method of vibration diagnostics of the turbine rotor damage is proposed based on the relative change in the natural frequency of the first mode shape of transverse of rotor vibrations at the stage of turbine repair during successive rotation of the rotor to a certain angle. The proposed method of vibration diagnostics of turbine rotors is sensitive enough to detect relatively small cracks, the size of which does not pose a threat to the integrity of the rotor.

Key words: vibration diagnostics, turbine rotor, natural frequencies, crack.

Габовда О.В.

Мукачівський державний університет

ДОСЛІДЖЕННЯ КОНЦЕПЦІЇ, ЩО ЛЕЖИТЬ В ОСНОВІ РОБОТИ БЕЗЛОПАТЕВИХ ВІТРОГЕНЕРАТОРІВ

В останні роки спостерігається стрімкий перехід на відновлювальні джерела енергії, серед яких лідером є енергія вітру. Традиційними вітрогенераторами є лопатеві вітрові турбіни з горизонтальною віссю, які розвивалися протягом кількох десятиліть. Незважаючи на те, що вітрові турбіни є джерелом чистої енергії, вони мають ряд недоліків: вони шкідливі для птахів, складні в монтажі та обслуговуванні, займають великі площі, погано вписуються в міський ландшафт та мають інші недоліки. Відносно недавно з'явилася нова концепція побудови вітрогенераторів, в яких відсутні лопаті. В основі їхньої будови лежить явище резонансу, що виникає, коли частота власних коливань щогли співпадає з частотою відриву вихорів «доріжки Кармана», яка утворюється потоком вітру при обтіканні тіла щогли. Ці вітрогенератори прості за конструкцією і значно дешевше у порівнянні з традиційними. Вони безпечні, безшумні, легкі, не мають поверхонь тертя, механічних передач, роторів, гальм, тому не потребують змащування та ін. Актуальність теми статті зумовлено тим, що ця альтернативна технологія може стати майбутнім вітроенергетики, тому у світі до неї прикута значна увага багатьох дослідників. Проте в Україні вона мало відома, незважаючи на важливість питання децентралізації енергопостачання для мінімізації руйнування великих енергетичних об'єктів під час ракетних атак. Тому її впровадження було б особливо корисним для нашої країни. Мета роботи – дослідити новий метод генерації енергії вітру. У статті розглянуто переваги безлопатевих вихрових вітрогенераторів у порівнянні з традиційними, досліджені основні умови індукції вихрових вібрацій, розглянуто різні режими використання вібраційної енергії, способи розширення робочого діапазону для підвищення продуктивності вітроустановок, зокрема, вбудовану магнітну систему налаштування, завдяки якій збільшується частота власних коливань щогли.

Ключові слова: безлопатевий вітрогенератор, «доріжка Кармана», резонанс, вихрово-індукована вібрація, число Струхаля, число Рейнольдса.

Постановка проблеми. Перехід на відновлювальні джерела енергії – це вимога часу задля досягнення певних глобальних цілей сталого розвитку у світі, зокрема в Україні. Серед відновлювальних джерел енергії найбільш динамічно розвивається вітроенергетика, основу якої на даний час складають лопатеві роторні вітрогенератори, які представлені великим різноманіттям видів, що відрізняються як за конструкціями, так й за потужностями.

Світовим лідером у використанні енергії вітру є Данія, вітроенергетика якої дозволяє не лише повністю забезпечити свої потреби в електриці, а й експортувати її до сусідніх Норвегії, Швеції та Німеччини. У 2023 році у Данії запрацював найбільший і найпотужніший у світі вітрогенератор висотою 280 м з довжиною лопатей 115,5 м, потужність якого на піку досягає 15 МВт. [1-2].

За останні десятиліття вітряні турбіни з горизонтальною віссю зазнали значного розвитку та оптимізації своїх компонентів, тобто на даний час це дуже зріла та консолідована технологія, але вона, не зважаючи на використання чистого

джерела енергії, потребує вдосконалення, навіть з точки зору екології. Тільки в США лопаті традиційних вітряних турбін щорічно вбивають більше півмільйона птахів, вже не кажучи про кажанів. SEO /BirdLife – організація, що працює над збереженням птахів та довкілля їхнього існування, підкреслює важливість інвестування в дослідження для розробки нових технологій, які дозволять суттєво знизити смертність птахів на ВЕС [3-4].

Ще однією з проблем є утилізація лопатей вітрових турбін. Сьогодні утилізувати можна до 90% всього, що є в вітротурбінах, крім лопатей, зроблених з композитних матеріалів і призначених для тривалого використання, а не для вторинної переробки. Середня довжина однієї лопаті близько 40 м, вага 7 т. Сьогодні ті лопаті, які не використовуються повторно, опиняються на смітнику (рис. 1).

У Європі зараз лише кілька підприємств можуть переробляти лопаті. Данський вітроенергетичний гігант Vestas наполегливо працює над переробкою лопатей турбін. «Сьогодні наші лопаті придатні для вторинної переробки приблизно на 42–43%.

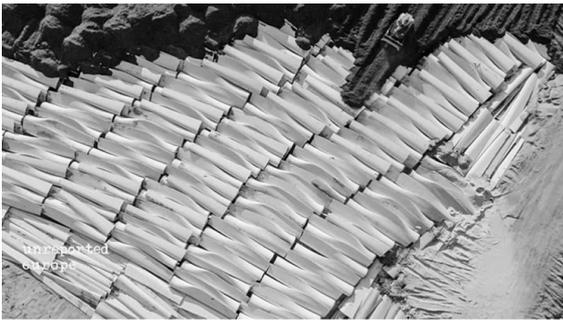


Рис. 1. Вид з висоти на кладовище турбінних лопатей у США [5]

Але якщо ви запитуєте, коли ми досягнемо цих 100%, я думаю, що це займе деякий час», – каже Ліза Екстранд, керівник відділу сталого розвитку Vestas. Іспанський стартап Reciclaía займається збиранням лопатей на переробку у Франції, Португалії та Північній Африці. Продуктивність переробки складає десь 1500 лез на рік [5].

Технологічний виклик традиційним вітрогенераторам, кинутий безлопатевиими вихровими резонансними вітрогенераторами Vortex. Він пов'язаний із високими технічними та екологічними перевагами. Основними перевагами є наступні:

1. Безшумність роботи (до 20 Дб).

2. Простота конструкції та зручність у виготовленні, монтажі та обслуговуванні, викликана відсутністю рухомих обертових частин (редукторів, передач, роторів, з'єднань тертя та ін.). Відповідно, нема потреби у змашуванні чи заміні частин через знос або втому.

3. Як наслідок, витрати на технічне обслуговування є низькими. Стандартизована вартість виробництва електроенергії (LCOE) для типової установки становитиме 0,035 доларів США за 1кВт, включаючи капітальні витрати, експлуатацію та технічне обслуговування, пропускну здатність, оренду землі, страхування та інші адміністративні витрати (рис. 2) [6].

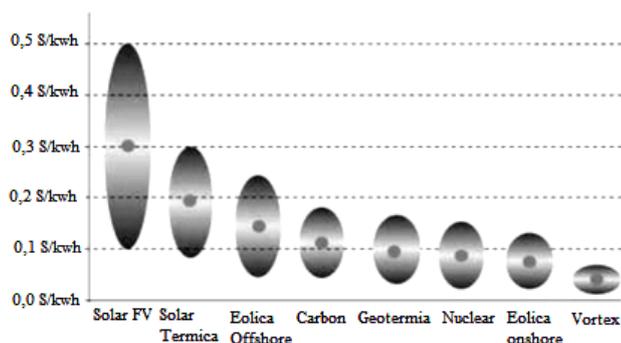


Рис. 2. Індекс LCOE (Levelised Cost of Energy) [6]

4. Можливість встановлення більшої кількості вітрогенераторів на одиницю площі. Крім того, експерименти показали, що вихори позаду установки можуть збільшити, за певних умов, ефективність найближчого заднього вітрогенератора.

5. Зменшення корозії, що виникає при встановленні VORTEX у агресивному морському середовищі (офшорні технології, що реалізуються в океані), у зв'язку з майже повною відсутністю шестерень, підшипників, гальм та інших деталей і вузлів з металів.

6. Гармонійно вписуються у міський ландшафт, добре поєднуються із сонячними панелями у випадку малопотужного гібридного обладнання та ін.

7. В умовах роботи у середовищі з низькими температурами відсутнє обледеніння в зв'язку з відсутністю обертових деталей.

Попри значні переваги безлопатевих вітрогенераторів, вони поки що виробляють менше енергії у порівнянні з традиційними вітровими турбінами, які вже десятиріччями використовуються й майже досягли піку у своєму розвитку.

В Україні цій інноваційній технології приділено мало уваги, тому є потреба дослідити концепцію цього способу вітрогенерації, фізичні принципи, на яких вона будується, та особливості проектування конструкцій.

Аналіз останніх досліджень і публікацій.

Технологію використання явища резонансу для виклику коливань в системі збору енергії вітру розробили іспанські інженери компанії VORTEX BLADELESS. Робота над безлопатевим вітрогенератором почалася ще у 2012 році. Цей проект отримав фінансування від програми Європейського Союзу з досліджень та інновацій Horizon 2020. Багато науковців та інженерів у світі продовжують експериментальну та дослідницьку діяльність з покращення параметрів вихрових резонансних вітрогенераторів для підвищення їх енергоефективності.

Стаття [7] президента, засновника компанії VORTEX BLADELES, інженера – науковця Девіда Дж. Янез Вільярреал присвячена найбільш загальним аспектам альтернативної технології, заснованої на взаємодії вітру та конструкції VIV (Вібрація, Індукована Вихором). На рисунку 3 представлено дві конструкції VORTEX. У статті «Оптимізація безлопатевих вітрових турбін: морфологічний аналіз і варіації діапазону блокування» [8], датованої квітнем 2024 року, представлені результати всебічного дослідження, проведеного ним разом з дослідниками кафедри картографії та землеустрою Саламанкського університету в Іспанії (один з най-

старіших і найпрестижніших університетів світу, заснований у 1218 році), яке охоплює теоретичні основи для розробки прототипу VIV, методологію розробки, використовуване обладнання (аеродинамічна труба, осцилограф, п'єзоелектричний датчик та ін.) й тестування шести прототипів з різними кутами розбіжності (від $-0,8^\circ$ до $3,2^\circ$) в геометрії обтічних тіл круглого перерізу та різною шорсткістю їх поверхонь (рис. 4).



Рис. 3. Vortex Nano висотою 0,85м (а), Vortex Atlantis висотою 9м (б) [8]



Рис. 4. Прототипи щогли зліва направо: циліндр, розбіжний конус (оригінальна модель) і збіжний конус. Світлий колір – прототипи з гладкою поверхнею, темний – з шорсткою (висота нерівностей 0,3 мм, відстань між ними – 0,8 мм) [8]

Стверджується, що вибір тестового діапазону швидкостей, заснований на теоретичних розрахунках і, починаючи від розрахованої мінімальної резонансної швидкості вітру 1,50 м/с до максимальної експериментально визначеної швидкості 10м/с, гарантує, що діапазон частот (5,5–10 Гц) ідеально узгоджується з робочими швидкостями вітрогенератора. Підтверджено, що форма прототипу має значний вплив на діапазон блокування (діапазон швидкості вітру, в якому досягається

вихідна потужність), тоді як шорсткість поверхні має мінімальний вплив.

Дослідженню обладнання для генерації енергії вітру, в основу якого покладене явище резонансу, присвячена стаття науковців Мігеля Анхеля Санчеса Ідальго та Рікардо Атьєнца Паскуала [6]. Експериментальні та числові оцінки вихрових безлопатевих вітрових турбін надані у статті групи дослідників факультету машинобудування та промислової інженерії університету Абу-Дабі та департаменту навколишнього середовища та громадського здоров'я (Об'єднані Арабські Емірати) [9]. Вчені декількох китайських університетів провели чисельні дослідження енергоефективності VIV установок в залежності від поперечного перерізу обтічних тіл (прототипів щогл) в їх тандемному розташуванні [10]. Вони на практиці дослідили поведінку в повітряному потоці декількох тіл з різними перерізами (призми: тригранна, квадратна, п'ятикутна, круглий циліндр та призма Cir-Tria) та встановили, що призма Cir-Tria має кращі показники збору енергії, а круговий циліндр набагато легше піддається впливу сліду («Доріжка Кармана»). До того ж оцінили сумісний вплив на енергоефективність двох установок при різних відстанях між ними. Сучасний огляд безлопатевих вітрогенераторів представлений у [11]. Стаття містить теоретичні основи утворення вихрових вібрацій з посиланням на науковців, які у свій час їх досліджували. Розглянуто різні режими використання вібраційної енергії, включаючи різні орієнтації та розширення поверхні обтічного тіла для збільшення робочого діапазону та підвищення продуктивності. В статті [12] приділено увагу перевагам VORTEX. Багато оглядового матеріалу публікується на сайті самої компанії VORTEX BLADELES [13].

Постановка завдання. Метою статті є дослідження концепції, що лежить в основі роботи безлопатевих вітрогенераторів, яке складається з аналізу технології VIV, залежностей між швидкістю вітру, геометричними параметрами обтічного тіла (щогли) та іншими параметрами, способу збільшення робочого діапазону швидкості вітру за рахунок збільшення частоти коливання щогли.

Зважаючи на зростаючий інтерес у світі до безлопатевих вітрогенераторів, які мають значні переваги перед вітровими турбінами, а також потреба у децентралізації постачання енергії, переході до розподіленої генерації енергії в Україні, щоб максимально уникнути руйнувань великих об'єктів виробітку енергії під час

ракетних атак, доцільно дослідити принципи роботи та конструкції установок на основі VIV. Як відмічено авторами статі [14], «Досвід трансформації енергосистеми для інтеграції значних обсягів енергії ВДЕ з негарантованою потужністю в таких країнах як Данія та Німеччина, а також ініціативи Чехії з децентралізації енергопостачання може бути корисним для України, з поправкою, звичайно, на поточну ситуацію».

Виклад основного матеріалу. Резонансний вихровий вітрогенератор Vortex є досить простою конструкцією, що складається з таких основних частин: щогла, виконана з композитного матеріалу, який має бути легким та жорстким; карбоновий консольний стрижень, на який опирається щогла; система генерації; система налаштування та нерухома основа на фундаменті (рис. 5). Для генерації енергії з вітру використовується аеродинамічний ефект, пов'язаний з появою послідовності вихорів за щоглою. Цей ефект отримав назву «Доріжка Кармана» (рис. 6). Резонанс вважається шкідливим явищем, що може викликати руйнування технічних систем, але саме він лежить в основі роботи VORTEX.

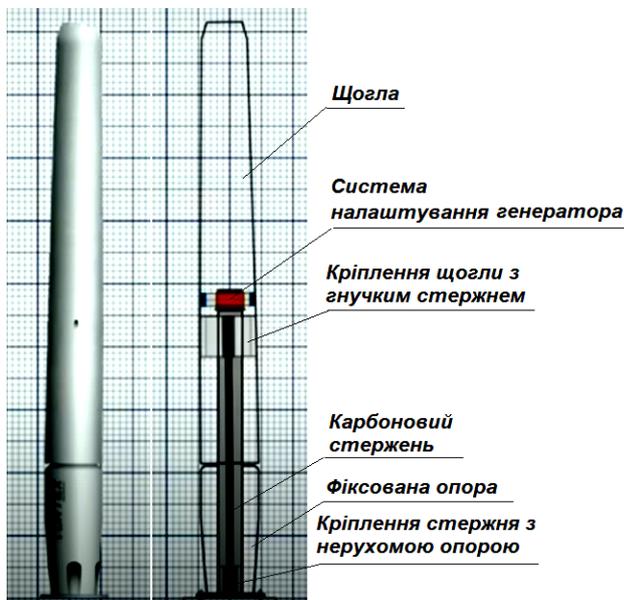


Рис. 5. Схема будови вітрогенератора VORTEX [15]

Поперечний переріз щогли має круглу форму, щоб установка працювала незалежно від напрямку вітру (коливання щогли кругові, а не лінійні), що дозволяє уникнути необхідності її переорієнтувати при його зміні.

Коли швидкість повітря наближається до тієї, при якій частота появи вихорів і коливань щогли збігаються, то виникає динамічне посилення руху, і щогла починає стабільно коливатися на резо-

нансній частоті, максимізуючи здатність поглинання енергії.

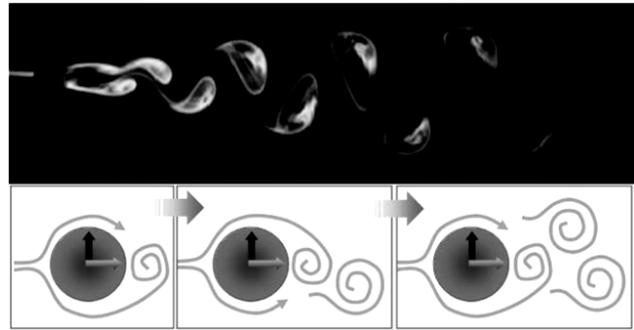


Рис. 6. Схема, що ілюструє утворення вихорів Кармана: підйомна сила (вертикальна стрілка); сила опору (горизонтальна стрілка) [6]

Механіка утворення вихору та вихрові області були описані Дж.Х. Джерардом, на роботу якого посилаються автори [9, 11]. В його моделі (рис. 7) взаємодія між шарами зсуву є критичним фактором у стимулюванні та формуванні вихрового сліду. Він постулював три умови, за яких частинки в протилежному шарі зсуву притягуються до області сліду: а) частинки можуть бути введені в область росту та зменшити їх міцність; б) вони можуть увійти в зсув шару та мають завихреність із позитивним та негативним знаком; с) вони можуть бути повторно введені в область ближнього сліду.

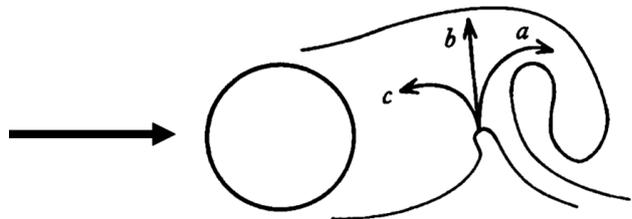


Рис. 7. Модель вихроутворення Джеррарда [9]

Діаметр щогли має збільшуватися з висотою, оскільки швидкість вітру також збільшується, щоб мати постійну частоту відриву вихорів по всій довжині щогли. Ілюстрація цієї вимоги надана на рисунку 8, де представлено два варіанти геометрії коливального тіла: циліндр і зворотний конус. У другому варіанті число вихорів по довжині розподіляється майже рівномірно.

Конструкцію верхньої частини щогли мусили звузити, щоб зменшити турбулентність («ефект голови»), яка утворювалася на верхівці щогли і порушувала ефективність обладнання (рис. 9).

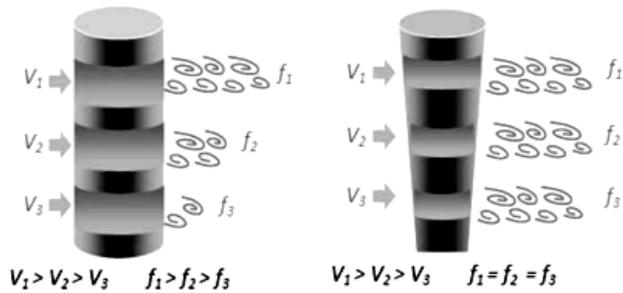


Рис. 8. Генерація вихорів у щоглі [6]

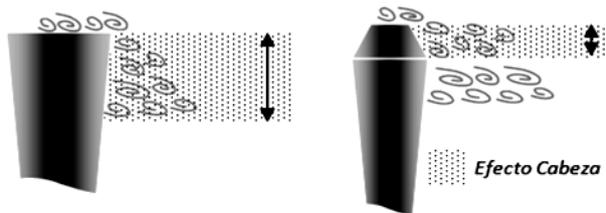


Рис. 9. Оптимізація турбулентності у верхній області [6]

Існує константа пропорційності St (число Струхалія), яка встановлює зв'язок між частотою відриву вихорів f , середньою швидкістю навігаючого потоку вітру V та шириною сліду, що залежить від діаметра поперечного перерізу D на певній висоті від землі. Зв'язок, виражений через частоту відриву вихорів, представлений формулою 1:

$$f = \frac{S_i \cdot V}{D} \quad (1)$$

Кореляція між числами Струхалія і Рейнольдса є такою, що число Струхалія постійно підтримує значення $St=0,2$ в широкому діапазоні Re ($250 < Re < 2 \times 10^5$). Зміна числа Рейнольдса має значний вплив на максимальну амплітуду жорсткого обтічного тіла. Число Рейнольдса для круглого перерізу дорівнює:

$$Re = \frac{V \cdot D}{\nu} \quad (2)$$

де $\nu = 1,46 \times 10^{-5}$ – кінематична в'язкість повітря.

Формула 1 добре підходить до статичних конструкцій, але для коливальних конструкцій вона потребує підгонки, де діаметр поперечного перерізу замінюється характеристичною довжиною d' .

$$d' = D + a \cdot x \quad (3)$$

де x – амплітуда коливань, a – коригувальний коефіцієнт, який залежить від числа Рейнольдса. Правильне коригування цього коефіцієнта дозволяє впорядковано розкидати вихори. Подальші роз'яснення надано за допомогою рисунку 10.

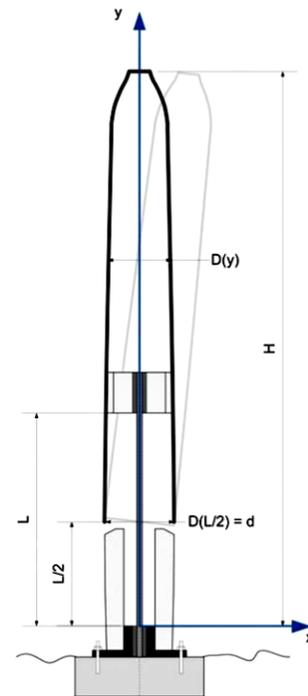


Рис. 10. Зміна діаметра щогли залежно від висоти [7]

Гнучкий стрижень довжиною L вмонтований у щоглу верхнім кінцем, нижній кінець закріплений нерухомо в основі установки. Приймається, що амплітуда коливань щогли x на висоті $y = L/2$ наближається до нуля. У цьому положенні характеристична довжина d' відповідно до (3) відповідає діаметру щогли $d' = D(L/2) = d$, а частота вихору f зі швидкістю вітру $V(L/2)$ становить:

$$f = \frac{S_i \cdot V(L/2)}{d} \quad (4)$$

У будь-якій іншій ділянці щогли, де величина коливань є достатньо значною, частота вихорів дорівнює:

$$f(y) = \frac{S_i \cdot V(y)}{D(y) + a \cdot x(y)} \quad (5)$$

де $V(y)$ і $x(y)$ – швидкість рідини та амплітуда коливань щогли на кожній висоті y , відповідно.

H – це відстань між місцем кріплення гнучкого стрижня з основою та найвищою частиною пристрою (рис. 10). Співвідношення максимального діаметра щогли та діаметра в її найнижчій частині позначається γ . На підставі цього амплітуда на певній висоті щогли буде така:

$$x(y) = \frac{y - L/2}{H - L/2} \cdot \gamma \cdot d \quad (6)$$

Оскільки частота виходу вихрів однакова по всій висоті щогли (див. рис. 8), праві частини формул (4), (5) прирівнюються, в результаті

чого отримується формула обчислення діаметрів щогли в кожному з перерізів:

$$D(y) = d \cdot \frac{V(y)}{V(L/2)} - a \cdot x(y) \quad (7)$$

Загалом VIV можна апроксимувати як простий гармонійний рух тіла з масою m , з'єднаний з пружним елементом, що має коефіцієнт пружності k та демпфером з константою демпфування c . (рис. 11). По тій моделі можна зрозуміти поведінку VIV. Маса щогли підтримується стрижнем з певною жорсткістю, а система гаситься генератором змінного струму та іншими втратами потужності.

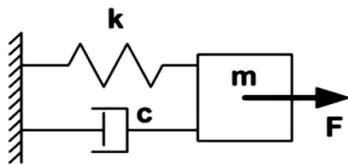


Рис. 11. Діаграма затухаючого гармонічного осцилятора [7]

Вся ця система резонує, коли частота виходу вихру, викликана вітром, наближається до наступної частоти:

$$f = \frac{1}{2\pi} \cdot \sqrt{\frac{k}{m} - \left(\frac{c}{2m}\right)^2} \quad (8)$$

Власна частота коливань всередині конструкції залишається постійною, обмежуючи діапазон корисних швидкостей вітру, де виникає резонанс (діапазон блокування). Щоб збільшити цей діапазон, потрібно розширити діапазон власних коливань щогли.

З цією метою Vortex розробив систему налаштування, засновану на системі магнітного керування з постійними магнітами, які збільшують видиму жорсткість системи відповідно до амплітуди її коливань.

При вбудованій системі налаштування до затухаючого гармонічного осцилятора додано дві пари постійних магнітів b . Однакові полюси стоять один проти одного. Ця пара магнітів має один прикріплений до коливальної маси (щогли), а інший – до нерухомого елемента конструкції основи (рис. 12).

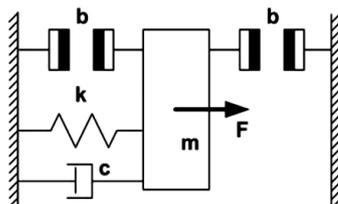


Рис. 12. Схема генератора з магнітною системою налаштування [7]

Магнітна сила, яка виникає між двома постійними магнітами, обернено пропорційна квадрату середньої відстані між їхніми полюсами, таким чином, що вони поведуться як пружина стиснення з непостійною пружністю, що залежить від зміщення. Коли вони наближаються, зростання сили відштовхування між ними зростає вище лінійного порядку. Отже, тепер частота і амплітуда коливань зростають згідно співвідношення:

$$f = \frac{1}{2\pi} \cdot \sqrt{\frac{(k + k(x))}{m} - \left(\frac{c}{2m}\right)^2} \quad (9)$$

де k' – коефіцієнт пружності, що відповідає магнітному відштовхуванню.

Незалежність коливань щогли від напрямку вітрового потоку, досягається за допомогою пари кілець постійних магнітів. Магнітне розташування кілець надано на рисунку 13. Поляризація може бути аксіальною (рис. 13а) або радіальною (рис. 13b).

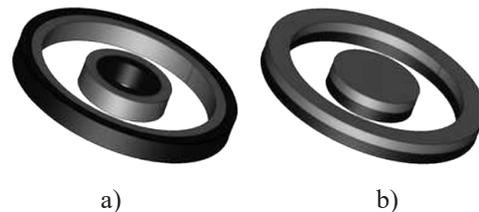


Рис. 13. Можливе розташування кілець постійного магніту, які використовуються для налаштування системи. Зовнішнє кільце кріпиться до щогли (осцилятор), а внутрішнє кільце кріпиться до основи (статор) [7]

Чим більша швидкість вітру, тим більша підйомна сила (напрямок, перпендикулярний вітру) і тим більша сила опору (напрямок вітру). Це призводить до того, що відстань L (рис. 14) між двома магнітами зменшується.

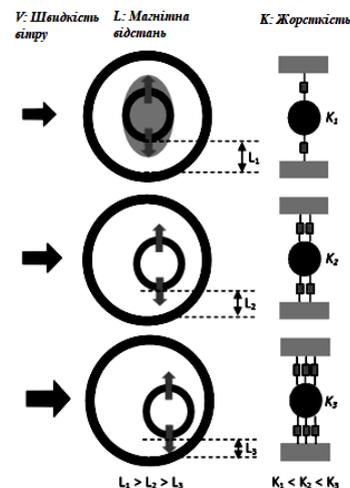


Рис. 14. Схема зміни жорсткості як функції переміщення [6]

Відповідно збільшується сила відштовхування, подібно до поведінки пружини, але зі змінною жорсткістю, яка залежить від зміщення, оскільки це магнітне відштовхування. Отже, чим вища швидкість, тим більша жорсткість щогли. Таким чином, завдяки цій системі розширюється корисний діапазон швидкостей вітру, при якому амплітуда обладнання є максимальною, тобто, максимізується період його роботи (рис. 15).

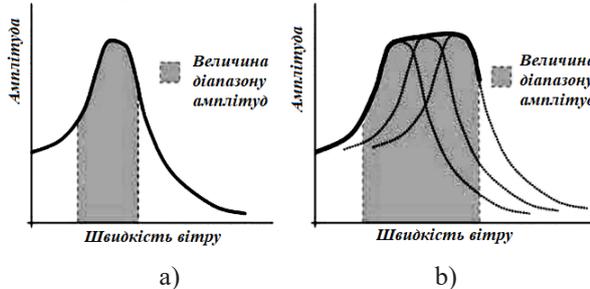


Рис. 15. Порівняння амплітудного діапазону: а) без системи налаштування; б) із системою налаштування [6]

В таблиці 1 наведені числа Рейнольдса, що відповідають максимальним значенням діапазону блокування (Max Lock-In) при різних кутах розбіжності прототипів щогл, отриманих у результаті випробувань [8].

При випробуваннях у аеродинамічній трубі, описаних у [7], було помічено, що коли сила вітру перевищує діапазон блокування, модель із вбудованою системою налаштування раптово припиняє працювати. З цього зроблено висновок, що гальмівні системи для боротьби з сильним вітром, які присутні у традиційних вітрових турбінах, в безлопатевих вітрогенераторах не потрібні.

Що стосується генерації електричної енергії у безлопатевих вітрогенераторах, вона отримується способом електромагнітної індукції за допомогою вертикального лінійного генератора змінного струму. Змінний характер руху щогли зумовлює конструкцію відповідного генератора для цієї технології. Одночасне використання мобільного кільця для вироблення електроенергії та вбудована система магнітного налаштування

в конструкції полегшує її та економить кошти. На рисунку 16 показано компоненти генератора. Кільця постійного магніту *b* закріплені на щоглі. Коли стрижень зі щоглою згинається, взаємодія з котушками та налаштованими магнітами, закріпленими на статорі *a*, збільшується. Частина статора генератора змінного струму підтримується конструкцією *c*, закріпленою на основі.

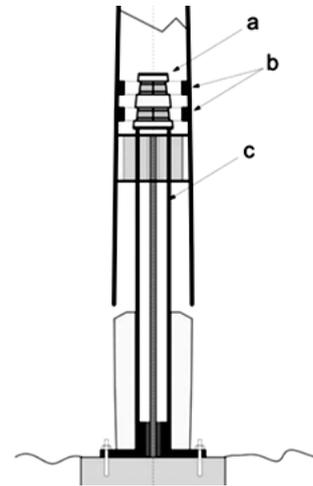


Рис. 16. Компонування генератора і системи налаштування

Вироблена електрична енергія перетворюється на змінний струм, який за допомогою випрямляча перетворюється на постійний струм.

Висновки. Розглянуто конструкції безлопатевих генераторів, які працюють в резонансному діапазоні від вібрацій, індукованих вихорами, що утворюються за щоглою при обтіканні її повітряним потоком. Аеродинамічна оптимізація установок зосереджувалася на покращенні геометрії та характеристик поверхні щогли. Форма щогли у перерізі має бути круглою, щоб робота установки не залежала від напрямку вітру, та збільшувалася у діаметрі по висоті, щоб частота відриву вихорів у кожному перерізі вздовж неї розподілялася рівномірно. Чим більше діаметр щогли, тим більша підйомна сила, тим більше амплітуда коливань. Шорсткість поверхні має незначний

Таблиця 1

Числа Рейнольдса (Re), що відповідають максимальним значенням діапазону блокування

| Prototype | Angle | VRMS [mV] | Re (Max Lock-In) |
|-------------------------|--------------|-----------|------------------|
| Convergent -0.8° | -0.8° | 1601 | 3800 |
| Straight 0° | 0.0° | 1631 | 4050 |
| Divergent 0.8° | 0.8° | 1708 | 4300 |
| Divergent 1.6° | 1.6° | 1766 | 4600 |
| Divergent 3.2° | 3.2° | 1829 | 5000 |

вплив на діапазон блокування (тільки при значних числах Рейнольдса).

Зазначено залежності між швидкістю вітру, числом Рейнольдса та частотою відриву вихорів. Розглянуто вбудовану систему магнітного налаштування за допомогою постійних магнітів для підтримки резонансу у більш широкому діапазоні швидкостей.

Найближча мета розробників Vortex побудувати 140-метровий безлопатевий генератор потужністю 1 мегават, а такого масштабу генератори можна об'єднувати у системи, тому подальші дослідження варто зосередити на процесах взаємного впливу установок у випадку їх просторового розташування та їхньої орієнтації, розгляді ефектів перешкод для цих установок, де залучаються ще такі параметри як кут атаки та співвідношення міжцентрової відстані і діаметра.

Список літератури:

1. Wind power generates 140% of Denmark's electricity demand. 2015. URL: <https://www.theguardian.com/environment/2015/jul/10/denmark-wind-windfarm-power-exceed-electricity-demand> (дата звернення: 08.07.2024).
2. У Данії запрацював найбільший і найпотужніший у світі вітрогенератор – його висота становить 280 метрів. URL: <https://sundries.ua/u-danii-zapratsiuvav-naibilshyi-i-naipotuzhnishi-yi-u-sviti-vitrohenerator-i-oho-vysota-stanovyut-280-metriv/> (дата звернення: 10.07.2024).
3. Joel Merriman. How Many Birds Are Killed by Wind Turbines? URL: <https://abcbirds.org/blog21/wind-turbine-mortality/> (дата звернення: 10.07.2024).
4. Іспанія. SEO/BirdLife. URL: <https://www.birdlife.org/partners/spain-seo-birdlife/> (дата звернення: 10.07.2024).
5. Monica Pinna. Recycling turbine blades: the Achilles heel of wind power. URL: <https://www.euronews.com/my-europe/2021/06/25/recycling-turbine-blades-the-achilles-heel-of-wind-power-and-the-controversy-engulfing-ren> (дата звернення: 12.07.2024).
6. Miguel Angel Sánchez Hidalgo, Ricardo Atienza Pascual. Nuevo concepto de generacion eolica. Aerogenerador sin palas por vorticidad // TECNOLOGÍ@ y DESARROLLO. Revista de Ciencia, Tecnología y Medio Ambiente/ Vol. XV. 2017. 18p. URL: <http://www.uaex.es/publicacion/nuevo-concepto-de-generacion-eolica-aerogenerador-sin-palas-por-vorticidad.pdf> (дата звернення: 08.07.2024).
7. David Jesús Yáñez Villarreal. VIV resonant wind generators. 2018. URL: https://www.researchgate.net/publication/331345449_VIV_resonant_wind_generators (дата звернення 10.07.2024).
8. Enrique González-González, David J. Yáñez, Susana Del Pozo and Susana Lagüela. Optimizing Bladeless Wind Turbines: Morphological Analysis and Lock-In Range Variations. Appl. Sci. 2024, 14(7), 2815; URL: <https://doi.org/10.3390/app14072815>.
9. Hasan Hamdan, Sharul Sham Dol, Abdelrahman Hosny Gomaa et. al. Experimental and numerical study of novel vortex bladeless wind turbine with an economic feasibility analysis and investigation of environmental benefits // Journal Energies 2024, 17(1), 214. URL: <https://doi.org/10.3390/en17010214>.
10. Zhang, B.; Song, B.; Mao, Z. et. al. Numerical investigation on VIV energy harvesting of bluff bodies with different cross sections in tandem arrangement/ Energy. 2017. Vol.133, P.723–736. URL: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2017.05.051>.
11. Tandel, R.; Shah, S.; Tripathi, S. A state-of-art review on Bladeless Wind Turbine. Journal of Physics: Conference Series. 2021. 1950, 012058. doi:10.1088/1742-6596/1950/1/012058. URL <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1742-6596/1950/1/012058/pdf> (дата звернення: 10.07.2024).
12. Садовий Я. Вітряк майбутнього придумали іспанські інженери /Урядовий кур'єр. 2021. №58(6926). С. How it works? URL: <https://vortexbladeless.com/technology/> (дата звернення: 10.07.2024).
14. Домбровський О., Гелегуха Г., Крамар В. Як запустити розподілену генерацію в Україні. 2024. URL: <https://www.epravda.com.ua/columns/2024/04/11/712293/> (дата звернення: 10.07.2024).
15. Vortex Bladeless How it Works, scheme. 2020. URL: <https://www.youtube.com/watch?v=lirOhO4nKlc> (дата звернення: 10.07.2024).

Habovda O.V. STUDY OF THE CONCEPT UNDERLYING THE OPERATION OF BLADELESS WIND GENERATORS

In recent years, there has been a rapid shift towards renewable energy sources, with wind energy leading the way. Traditional wind generators are horizontal-axis wind turbines, which have been developed over several decades. Despite being a source of clean energy, wind turbines have several drawbacks: they are harmful to birds, complex to install and maintain, occupy large areas, and do not blend well into urban landscapes, and other disadvantages. A new concept for building wind turbines without blades has relatively recently emerged. The basis of their structure is the phenomenon of resonance, which occurs when the frequency of the mast's own oscillations coincides with the frequency of separation of the vortices of the "Karman street", which are formed by the flow of wind when flowing around the body of the mast. These wind generators esare simple in design and there foresignificantly cheaper compared to traditional ones. They are safe, silent, light weight, and do not have friction surfaces, mechanical transmissions, rotors, orbrakes, thuse liminating then eed forlubrication and other maintenance. The article examines the advantages of bladeless vortex wind turbines compared to traditional ones, investigates the main conditions for inducing vortex vibrations, considers various modes of utilizing vibrational energy, and discusses methods to expand the operational range to improve the productivity of wind installations, including an integrated magnetic tuning system that increases the natural frequency of mast oscillations.

Key words: bladeless wind generator, Karman street, resonance, Vortex Induced Vibration, Strouhal number, Reynolds number.

Пешко В.А.

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

Коновалюк О.Л.

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

ЗАКОНОМІРНОСТІ ФОРМУВАННЯ ТЕМПЕРАТУРНОГО ПОЛЯ РОТОРА ТУРБІНИ ПІД ЧАС ПУСКОВОГО РЕЖИМУ РОБОТИ

Під час пуску парових турбін інтенсивно накопичується пошкодження в основному металі за механізмом малоциклової втоми. Ключовою причиною цього явища є високі інтенсивності напружень в зонах концентрації, які суттєво зростають через нерівномірність температурного поля ротора. Пошук рішень щодо нормалізації теплового стану ротора є актуальною задачею для забезпечення довговічності експлуатації турбіни. В роботі досліджено ротор середнього тиску турбіни К-200-130. Розроблено тривимірний аналог ротора, який враховує всі особливості геометрії його високотемпературної частини. Представлено та проведено порівняльний аналіз двох типових графіків пуску турбіни К-200-130 з холодного стану, що використовуються на українських ТЕС. Наведено математичну модель розрахунку теплового стану ротора за рахунок вирішення крайової задачі теплопровідності у нестационарній постановці. Отримано розподіл температур в основному металі ротора турбіни К-200-130 в кожен момент часу пуску з холодного стану для двох різних технологій пуску. Встановлено, що провідну роль у формуванні температурного поля турбіни має тривалість окремих пускових етапів, параметри пари та витрата. Розраховано динаміку зміни градієнтів температур в характерних областях ротора при пуску з холодного стану для двох енергоблоків. Максимум градієнта температур зустрічається в області між кінцевими ущільненнями і першим диском та припадає на момент поштовху ротору до частоти холостого ходу, коли витрата пари зростає найбільш стрімко за короткий проміжок часу. Відмічено позитивний вплив більш тривалого етапу попереднього прогріву проточної частини на загальну рівномірність температурного поля ротора на подальших етапах пуску. Відмічено, що з завершенням пускового режиму роботи градієнт температур зменшується через стабілізацію теплового поля. Доречною є раціоналізація пускового графіку на початкових етапах роботи для забезпечення рівномірності теплового стану ротора.

Ключові слова: парова турбіна, ротор, пуск, температура, градієнт температур, нерівномірність, тепловий стан.

Постановка проблеми. Дефіцит маневрових потужностей в Об'єднаній енергетичній системі України призводить до частого залучення енергоблоків 200-300 МВт теплових електростанцій (ТЕС) до покриття пікових навантажень та регулювання електрогенерації [1, с. 43]. Такий режим роботи передбачає більш часте проведення операцій пуску та зупинки енергетичного обладнання. Відомо, що під час пуску основне устаткування електростанцій зазнає додаткового змінного навантаження, яке призводить до прискореного накопичення малоциклової втоми в високотемпературних елементах [2, с. 12].

Доцільним є дослідження факторів, що призводять до передчасного виходу з ладу обладнання ТЕС та запровадження заходів, які зможуть обмежити даний негативний вплив. Саме тому,

дослідження особливостей формування теплового стану ротора парової турбіни є актуальною задачею, оскільки дозволить розробити заходи для забезпечення рівномірності теплового поля та зменшення температурних напружень під час експлуатації на змінних режимах роботи [3, с. 506].

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Паркова допустима кількість пусків парової турбіни ТЕС протягом її життєвого циклу визначається нормативними документами України та складає 400-1000 пусків з різних теплових станів [4, с. 8]. При цьому фактичні дані експлуатації турбін в енергосистемі демонструють кількаразове перевищення даного показника (2000-3000 циклів пуску), що веде до неминучого накопичення розсіяного втомного пошкодження за механізмами малоциклової втоми [5, с. 1144]. Подальший роз-

виток втомних пошкоджень до макро-тріщин в елементах роторів парових турбін значно інтенсифікується при високих температурах металу [5, с. 1155], що пов'язано зі зміною фізико-механічних властивостей сталі [6, с. 2].

Основними факторами, що визначають допустиму кількість пусків турбіни є амплітуда інтенсивності деформації в основному металі ротора протягом циклу, робоча температура та коефіцієнт асиметрії циклу навантаження [7, с. 3]. При цьому відмічається, що на формування інтенсивності деформації при пуску провідну роль мають не лише механічні напруження, а і навантаження термічної природи, зокрема градієнт температур [8, с. 15].

Нерівномірність температурного поля ротора турбіни є одним із ключових факторів появи термічних напружень. Основними причинами утворення нерівномірного теплового стану ротора є відмінність параметрів пари в осьовому та радіальному напрямку проточної частини, різні умови теплообміну на поверхнях та складна геометрична форма самого ротора [9, с. 6]. Для оцінки даної нерівномірності необхідно вирішувати задачу нестационарної теплопровідності, яка потребує задання граничних умов теплообміну I-IV роду [10, с. 26].

Одним із поширених підходів дослідження умов нестационарної теплопровідності є використання методів розрахункової гідродинаміки CFD (computational fluid dynamics). До прикладу, в роботі [11, с. 6] досліджувалась течія пари в циліндрі середнього тиску реально-існуючої турбіни, що складається з трьох ступенів, які зазнали пластичної деформації після тривалої експлуатації. Авторами досліджено вплив цієї зміни на термодинамічні параметри пари. Для вирішення даної задачі в роботі застосовано власний CFD код, що розроблений в університеті Тохоку. Моделювання проточної частини здійснено за допомогою 3D-сканування елементів проточної частини. Проведені дослідження дозволили встановити що зміна геометрії лопаткового апарату призвела до змін у кінематиці потоку та обсягів втрат пари після ступенів, які в свою чергу призводять до підвищення статичної температури пари у вихлопі та зниження економічності турбіни [11, с. 11].

Іншим поширеним підходом є використання аналітичних методів визначення граничних умов теплообміну. Для цього використовуються критеріальні рівняння, що отримуються експериментальним шляхом на базі теорії подібності. В роботі [12, с. 473] представлено рівняння для розрахунку коефіцієнтів тепловіддачі на поверхнях ротора турбіни. При цьому відмічено, що для

різних поверхонь (ущільнення, поверхня дисків, канавки лопаток) повинні застосовуватись різні рівняння подібності.

Для забезпечення достовірності обох підходів критичним є врахування характеру перехідного процесу під час пуску, який можна оцінити за допомогою пускових графіків [13, с. 4]. Здійснюючи розрахунки у нестационарній постановці з'являється змога встановити динаміку зміни експлуатаційних параметрів турбіни та оцінити їхній вплив на термонапружений стан роторів. Проведені авторами розрахунки показали значний ступінь співпадіння розрахункових даних по температурі металу та реально вимірних даних під час пуску (відхилення не більше 4 %) [13, с. 5].

Одним із результатів розвитку підходів дослідження теплового стану може бути впровадження системи онлайн-моніторингу термічних напружень [14, с. 772]. Для цього розробляється математична модель, що встановлює залежність між стандартними параметрами роботи турбіни, за якими вже організовано контроль та температурою металу і термічними напруженнями. Автором запропоновано використання функції Гріна та інтегралу Дюамеля для описання динаміки зміни цих параметрів на прикладі ротора турбіни. Застосовано метод скінченних елементів щоб отримати конкретні значення температури металу та інтенсивності напружень в характерних областях для розрахунку поправочних коефіцієнтів функції Гріна [14, с. 768]. Також, в роботі відмічено, що найвищий рівень напружень в досліджуваному роторі спостерігається в момент часу коли градієнти температур досягають свого максимуму [14, с. 771].

Постановка завдання. Метою статті є встановлення закономірностей формування нестационарного поля температур ротора середнього тиску (РСТ) турбіни К-200-130 при пуску з холодного стану металу. Для досягнення поставленої мети вирішуються наступні задачі:

- розроблення геометричного аналогу ротора середнього тиску турбіни К-200-130;
- розрахунок нестационарних граничних умов теплообміну для ротора середнього тиску під час пускового режиму роботи енергоблоку 200 МВт;
- дослідження теплового стану ротора під час пуску турбіни з холодного стану за різними технологіями (графіками пуску);
- порівняльний аналіз динаміки зміни градієнтів температур під час пуску за різними графіками.

Виклад основного матеріалу. В даній роботі розглядається тепловий стан ротор середнього

тиску турбіни К-200-130 при пуску з холодного стану. Турбіни такого типу встановлені на 37 енергоблоках українських ТЕС. Для дослідження обрано саме ротор середнього тиску, оскільки дана турбіна має проміжний перегрів пари і температура середовища, що контактує з регулюючим ступенем РСТ, є найвищою. Окрім цього, його масо-габаритні характеристики є теж більш значними в порівнянні з ротором високого тиску. Вказані вище обставини призводять до появи найвищих інтенсивностей напружень в роторі середнього тиску.

На рис. 1 представлено розроблену геометричну модель ротора середнього тиску турбіни К-200-130. Виконано побудову високотемпературної частини ротора – від шийки валу в області опорно-упорного підшипника до діафрагмових ущільнень 4-го ступеня. Просторовий аналог ротора включає лише ковану частину, без врахування лопаткового апарату, однак сама геометрія валу відтворена з високою точністю у відповідності до паспортного креслення турбіни.

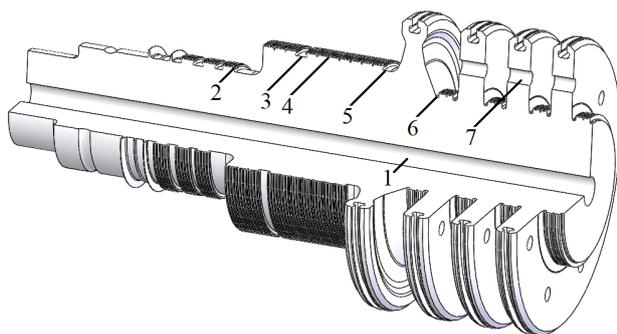


Рис. 1. Геометричний аналог ротора середнього тиску турбіни К-200-130 (цифрами вказано характерні області дослідження температурних градієнтів)

Технологія пуску турбіни К-200-130 з холодного стану (ХС) реалізується при температурі металу корпусу в області регулюючого ступеня ЦВТ менше 150 °С. При цьому пуск здійснюється на ковзаючих параметрах пари з поступовим збільшенням початкового тиску та температури. На рис. 2 представлено графіки пуску з ХС, які реалізуються на двох електростанціях України. Процес пуску енергоблоку є складним режимом експлуатації, який складається з багатьох етапів, однак для турбіни можна виділити 5 основних етапів (рис. 2): *I* – попередній прогрів проточної частини, *II* – поштовх турбіни до холостого ходу, *III* – синхронізація генератора з енергосистемою, *IV* – набір номінального навантаження 200 МВт, *V* – стабілізація температурного поля.

Слід виділити основні відмінності представлених графіків пуску (рис. 2). Етап попереднього нагріву проточної частини (*I*) є на 40 хв довшим для блоку № 2. Це дозволяє забезпечити більш рівномірний прогрів проточної частини другого блоку та виконувати подальші етапи пуску парою з більш високою температурою $T_{гп}$. Поштовх та розгін турбіни до холостого ходу (*II*) блоку 1 виконується повільніше, з більшою витратою пари, проте меншою ентальпією. Аналогічно, навантаження енергоблоку № 1 від 0 до 150 МВт триває 235 хв (для блоку № 2 – 190 хв), що також пов'язано з меншою температурою металу турбіни на момент синхронізації.

Така швидкість проходження етапів *II*, *III* і *IV* на блоці 2 вимагає якісного виконання графіку навантаження та потребує досвідченого оперативного персоналу, що зможе швидко діагностувати технічний стан та аналізувати експлуатаційні показники енергоблоку, не лишаючи простору для помилкових дій. З виходом енергоблоків на електричну потуж-

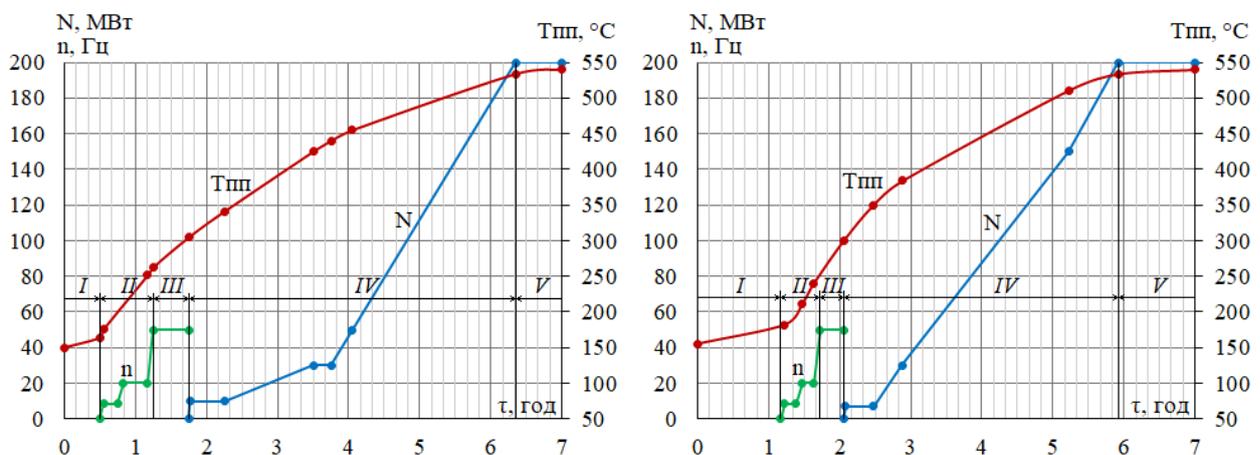


Рис. 2. Графіки пуску турбіни К-200-130, що реалізуються на ТЕС України при початковій температурі металу 100 °С: а – блок 1, б – блок 2

ність 200 МВт параметри пари (витрата, температура, тиск) для обох варіантів стають подібними. Таким чином, загальний час пуску від I до V етапу складає 381 хв для блоку 1 та 355 хв – для блоку 2.

У відповідності до представлених графіків пуску вирішувалась задача теплопровідності в основному металі, яка має наступний вигляд:

$$\frac{\partial T}{\partial \tau} = \frac{\operatorname{div}[\lambda(T) \cdot \operatorname{grad}(T)]}{c(T) \cdot \gamma(T)} \quad (1)$$

де T – температура металу; λ , c , γ – температурозалежні коефіцієнти теплопровідності, теплоємності та питомої ваги відповідно.

Граничні умови другого роду описують тепловий потік на поверхні тіла:

$$q = -\lambda \left(\frac{\partial T}{\partial n} \right) = f(x, y, z, \tau) \quad (2)$$

Граничні умови третього роду описують закономірності теплообміну між паровим середовищем та зовнішньою поверхнею ротора:

$$-\lambda \left(\frac{\partial T}{\partial n} \right) = \alpha(t_n - t_m) \quad (3)$$

де α – коефіцієнт тепловіддачі; t_n , t_m – температура пари та металу ротора відповідно.

Для розрахунку коефіцієнтів тепловіддачі використано рівняння подібності, що відрізняються в залежності від типу досліджуваної поверхні. До прикладу, для бокової поверхні дисків ступенів ротора, що обертаються в кожуху між сусідніми діафрагмами, використано наступне рівняння:

$$Nu = 0,0256 \cdot (1 - z_\varphi)^{0,75} \cdot Re^{0,75} \cdot Pr^{0,6} \cdot \left(\frac{s}{r} \right)^{0,25} \quad (4)$$

де Nu , Re , Pr – числа подібності Нуссельта, Рейнольдса та Прандтля відповідно; z_φ – коефіцієнт закрутки потоку; s – зазор між диском та діафрагмою; r – середній радіус диска.

В результаті було отримано нестационарний розподіл температур в металі ротора при пуску з ХС для обох графіків. На рис. 3 представлено приклад такого теплового стану ротора перед синхронізацією турбогенератора (початок етапу III на рис. 2 б). Найвищий рівень температур характерний для периферійної частини дисків ротора, який поступово зменшується від першого до четвертого ступеня. Також високі температури спостерігаються в області діафрагмових ущільнень, що пов'язано з інтенсивним теплообміном через стиснення потоку. Від першого сегменту кінцевих ущільнень до лівого кінця валу відбувається поступове зменшення температури зовнішньої поверхні металу.

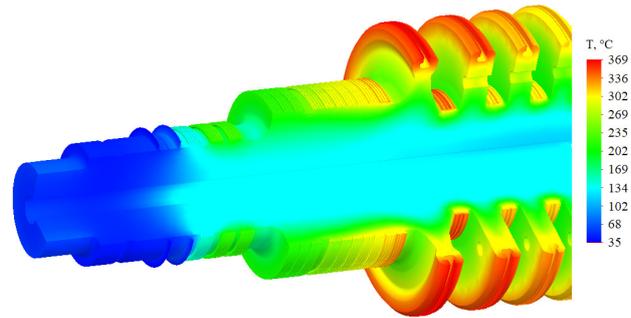


Рис. 3. Тепловий стан ротора середнього тиску турбіни К-200-130 енергоблоку № 2 при роботі на частоті холостого ходу перед синхронізацією

Аналогічні результати були отримані в кожен момент часу пуску з ХС для обох енергоблоків.

Як зазначалось в [8, с. 15; 14, с. 771] провідну роль при формуванні температурних напружень має нерівномірність теплового поля. На рис. 4 представлені градієнти температур в характерних областях ротора середнього тиску турбіни К-200-130 (рис. 1) при пуску з холодного стану металу.

Порівнюючи загальну динаміку зміни градієнтів температур, можна зазначити, що найбільша нерівномірність поля температур припадає на період поштовху роторів від 5 об/хв до 3000 об/хв (етап II на пускових графіках). В ці моменти часу суттєво зростає витрата пари на турбоустановку, що збільшує інтенсивність теплообміну між середовищем та основним металом.

Максимальні значення градієнтів температур для обох енергоблоків подібні ($\operatorname{grad} T_1 = 4080$ °C/м, $\operatorname{grad} T_2 = 4060$ °C/м). Максимум зустрічається в області галтельного скруглення між першим сегментом кінцевих ущільнень і першим диском (т. 5 на рис. 1) та припадає на момент поштовху ротору до частоти холостого ходу після витримки на частоті 1200 об/хв, коли витрата пари зростає найбільш стрімко за короткий проміжок часу.

Для решти досліджуваних областей помітний суттєво менший рівень градієнтів температур а також менш значні коливання цієї величини. Причиною покращення рівномірності температурного поля блоку 2 слугує більш тривалий етап попереднього прогріву проточної частини при пуску.

Із завершенням пускового режиму нерівномірність температурного поля зменшується для обох енергоблоків.

Важливо зазначити, що градієнти температур досліджувались на поверхні металу, що і є ключовою причиною їх високих величин. Значення градієнтів температур суттєво зменшуються для глибших шарів металу та є достатньо рівно-

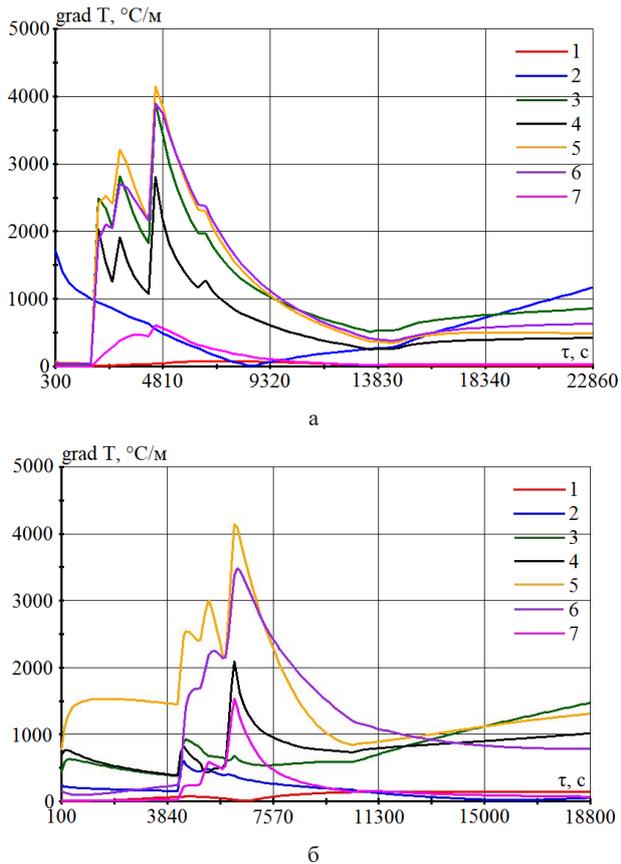


Рис. 4. Градієнти температур в характерних областях ротора при пуску з холодного стану: а – блок 1, б – блок 2

мірними для осевого отвору турбіни (зона 1 на рис. 4). Проте в той же час, верхні шари металу представляють найвищий інтерес, оскільки саме

в них утворюються мікро пошкодження протягом експлуатації.

В подальшому, буде досліджено напружено-деформований стан та показники малоциклової втоми ротора при експлуатації за представленими графіками пуску у відповідності до методики, представленої в [15, с. 18].

Висновки. Досліджено тепловий стан ротора середнього тиску турбіни К-200-130 при пуску з холодного стану за двома різними технологіями. Встановлено, що максимальна нерівномірність теплового поля характерна в моменти різкого збільшення параметрів пари та її витрати на турбоустановку. Зонами появи високих градієнтів температур є області різкої зміни геометрії, такі як кінцеві та діафрагмові ущільнення, а також галтели дисків, в яких діагностуються тріщини втоми.

Для РСТ турбіни К-200-130 максимальні значення градієнтів температур при пуску складають близько $4000^{\circ}\text{C}/\text{м}$ та характерні для області між кінцевими ущільненнями та першим диском в момент поштовху ротора до частоти холостого ходу. Із завершенням пускового режиму значення градієнту температур для цієї та інших областей не перевищує $1000^{\circ}\text{C}/\text{м}$.

Досягти рівномірності теплового стану турбіни можна раціоналізуючи пускові графіки та змінюючи схему подачі пари до проточної частини та кінцевих ущільнень. При цьому необхідно врахувати негативний вплив таких заходів на економічність та маневрові показники енергоблоку, що є актуальним для подальших досліджень.

Список літератури:

1. Черноусенко О.Ю., Бутовський Л.С., Грановська О.О., Пешко В.А., Мороз О.С. Вплив роботи у маневрених режимах енергоблоків ТЕС на техніко-економічні характеристики. *Системні дослідження в енергетиці*. 2016. № 2 (45). С. 43–51. <https://doi.org/10.15407/pge2016.02.043>
2. Rúa J., Verheyleweghen A., Jäschke J., Nord L. Optimal scheduling of flexible thermal power plants with lifetime enhancement under uncertainty. *Applied Thermal Engineering*. 2021. № 191. 116794. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2021.116794>
3. Balitskii O.I., Kolesnikov V.O., Ivaskevych L.M., Havrylyuk M. R. The Influence of Specific Features of Load and Hydrogen Charging on Steel Tribotechnical Properties. *Materials Science*. 2023. № 58. С. 505–512. <https://doi.org/10.1007/s11003-023-00691-5>
4. Контроль металу і продовження терміну експлуатації основних елементів котлів, турбін і трубопроводів теплових електростанцій. СОУ-Н МПЕ 40.17.401:2004 / Міністерство палива та енергетики України. 2005. 76 с.
5. Peshko V.A., Bovsunovskiy A.P. Patterns of Growth of an Internal Annular Crack Under the Influence of Thermal Stresses During Turbine Startup. *Strength of Materials*. 2024. № 6(55). P. 1143–1156. <https://doi.org/10.1007/s11223-024-00604-0>
6. Balitskii A.I., Havrylyuk M.R., Balitska V.O., Kolesnikov V.O., Ivaskevych L.M. Increasing Turbine Hall Safety by Using Fire-Resistant, Hydrogen-Containing Lubricant Cooling Liquid for Rotor Steel Mechanical Treatment. *Energies*. 2023. № 16. 535. <https://doi.org/10.3390/en16010535>
7. Azeez A., Eriksson R., Leidermark D., Calmunger M. Low cycle fatigue life modelling using finite element strain range partitioning for a steam turbine rotor steel. *Theoretical and Applied Fracture Mechanics*. 2020. № 107. 102510. <https://doi.org/10.1016/j.tafmec.2020.102510>

8. Banaszkiwicz M. The low-cycle fatigue life assessment method for online monitoring of steam turbine rotors. *International Journal of Fatigue*. 2018. № 113. P. 311–323. <https://doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2018.02.032>
9. Шерфедінов Р., Усатий О. Оцінка можливості використання повідсікового моделювання процесів в проточній частині парової турбіни в задачах одночасної оптимізації теплових схем та турбін. *Вісник Національного технічного університету «ХПИ»*. 2024. №3. С. 5–14. <https://doi.org/10.20998/2078-774X.2023.03.01>
10. Черноусенко О. Ю., Риндюк Д. В., Пешко В. А. Оцінка залишкового ресурсу та подовження експлуатації парових турбін великої потужності (частина 3). Київ, 2020. 308 с. <https://ela.kpi.ua/handle/123456789/41565>
11. Yamamoto S., Uemura A., Miyazawa H., Furusawa T., Yonezawa K., Umezawa S., Ohmori S., Suzuki T. A numerical and analytical coupling method for predicting the performance of intermediate-pressure steam turbines in operation. *Energy*. 2020. № 198. 117380. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2020.117380>
12. Wang W. Z., Buhl P., Klenk A., Liu Y. Z. The effect of in-service steam temperature transients on the damage behavior of a steam turbine rotor. *International Journal of Fatigue*. 2016. № 87. P. 471–483. <https://doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2016.02.040>
13. Zhao X., Ru D., Wang P., Gan L., Wu H., Zhong Z. Fatigue life prediction of a supercritical steam turbine rotor based on neural networks. *Engineering Failure Analysis*. 2021. № 127. 105435. <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2021.105435>
14. Banaszkiwicz M. On-line monitoring and control of thermal stresses in steam turbine rotors. *Applied Thermal Engineering*. 2016. № 94. P. 763–776. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2015.10.131>
15. Chernousenko O., Rindyuk D., Peshko V., Chernov O., Goryazhenko V. Development of a System for Estimating and Forecasting the Rational Resource-Saving Operating Modes of TPP. *Eastern European Journal of Enterprise Technologies*. 2020. № 8(105). P. 14-23. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2020.204505>

Peshko V.A., Konovaliuk O.L. CHARACTERISTIC FEATURES OF THE TEMPERATURE FIELD FORMATION IN THE TURBINE ROTOR DURING THE START-UP MODE OF OPERATION

During the start-up of steam turbines, damage accumulates intensively in the base metal due to the mechanism of low-cycle fatigue. The key reason for this phenomenon is high stress intensities in the concentration zones, which increase significantly due to the uneven temperature field of the rotor. Finding solutions to normalize the thermal state of the rotor is an urgent task to ensure the durability of the turbine. The paper investigates the intermediate-pressure rotor of the K-200-130 turbine. A three-dimensional analog of the rotor has been developed, which takes into account all the features of the geometry of its high-temperature part. A comparative analysis of two typical start-up graphs for the K-200-130 turbine from the cold state is presented. A mathematical model for calculating the thermal state of the rotor by solving the heat conduction problem in a nonstationary formulation is presented. The temperature distribution in the base metal of the rotor of the K-200-130 turbine at each moment of start-up from a cold state for two different start-up technologies is obtained. It was found that the duration of individual start-up stages, steam parameters, and flow rate play a leading role in the formation of the turbine temperature field. The dynamics of changes in temperature gradients in characteristic areas of the rotor during startup from a cold state for two power units was calculated. The maximum temperature gradient is found in the area between the end seals and the first disk and occurs at the moment of the rotor's push to the idling frequency, when the steam consumption increases most rapidly in a short period of time. The positive effect of a longer preheating stage of the flow part on the overall uniformity of the rotor temperature field at the subsequent stages of startup was noted. It is noted that with the completion of the startup mode of operation, the temperature gradient decreases due to the stabilization of the thermal field.

Key words: steam turbine, rotor, start-up, temperature, temperature gradient, unevenness, thermal state.

Ryndyuk D.V.

National Technical University of Ukraine “Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute”

Bednarska I.S.

National Technical University of Ukraine “Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute”

MODELING OF STEAM GAS DYNAMICS IN MAIN PIPELINES OF NUCLEAR POWER PLANTS

The article considers the process of wet steam flow through the main steam pipelines of nuclear power plants. The system of main steam pipelines, which is designed to transport steam from the steam generator to the high pressure cylinder of the turbine, is considered. The gas-dynamic properties of the medium moving by these steam pipelines are investigated. The simulation of the process of wet steam flow from one of the steam generators is performed. The task is presented in a 3-dimensional, stationary setting, using a model of fully compressible fluid. The article presents the results of the first stage of a set of numerical experiments. A good agreement was obtained with the data of control and measuring devices located on the steam pipelines of Unit №2 of the Nuclear Power Plant. The result is a 3-D gas-dynamic structure of the flow, the distribution of velocities in the flow, temperature fields, pressure distributions. Analysis of the results of numerical simulations made it possible to study in detail the gas-dynamic characteristics of the flow of wet steam through steam pipelines. Based on numerical simulations, the influence of steam pipe geometry on gas flow dynamics can be estimated. Based on the obtained results, graphs of pressure drop on each of the four steam pipelines at characteristic points in the calculation schemes are constructed. As a result of the simulation of the process of wet steam flow from the steam generator №2 through steam pipelines to the check valve on the power unit №2 of NPP, data on the distribution of pressures, temperatures and velocities of the environment by steam volume. The adequacy of the numerical model and the correctness of the modeling were verified by comparing the calculated results with the NPP data. Comparison of research results and real data gave a satisfactory match. The average relative error of the model is about 5%. The developed simulation model is adequate and can be used to calculate the parameters of steam flow in steam pipelines.

Key words: nuclear power plant, steam pipelines, gas dynamics, mathematical modeling.

Formulation of the problem. Nuclear energy is the main alternative to fossil fuels – coal, oil and gas in the field of electricity generation, as well as reducing the emission of carbon dioxide and thus reducing the greenhouse effect [1].

According to various sources, the share of nuclear power plants in electricity generation has been gradually increasing recently [1]. However, some NPP units are close to exceeding their design life – 40 years [2].

Due to the approaching expiration of the installed life of the NPP power unit, the problem of assessing the technical condition of the equipment, forecasting the residual life and extending the term of its further operation becomes urgent. This means that it is necessary to develop tools and methods for uninterrupted long-term operation of the station elements in accordance with the requirements of the energy system, to begin assessing the life of equipment and make recommendations for its further work [3].

All this inevitably requires a set of measures to analyze the condition of the main equipment (turbine rotors and housings, valves, base metal of steam pipelines), address the issue of possible further operation, as well as develop measures to extend service life.

It should be noted that extending the life of existing nuclear power plants is one of the most effective ways to ensure the return on investment in the energy sector in the world [3].

One of the important elements of equipment at nuclear power plants is the steam distribution system. The system of "fresh" steam pipelines is designed to transport saturated steam from the steam generator to the high pressure cylinder (HPC) of the turbine and superheater (SP) [11]. The first step in determining the state of steam pipelines is to study the gas-dynamic properties of the medium moving through these steam pipelines.

Analysis of recent research and publications. Modern development of science and computer technology makes it possible to study objects that

are too complex for analytical research with the help of mathematical models created in automatic design systems. It is known that the method of testing a computer model is one of the important problems that must be solved if the goal is to correctly predict the variable temperature field. In [4] the possibility of using measurements of vapor temperature and temperature of selected points of the studied elements to determine the boundary conditions of the heat transfer problem, as well as verify the operational correctness of the developed computer models.

Also in [5] developed his own method of analysis of mechanical behavior of the power plant component, which includes analysis of temperature fields taking into account the boundary conditions based on the operating parameters and the model of thermoplastic material.

Important in the study of gas-dynamic properties of the medium is the effect of time-varying heat transfer coefficient on the course of temperature, which was studied in [6]. The object of the test was a steam valve. The standards provide for a constant value of this factor in the design of such a component. However, given that in the devices used in energy, the physical state of the environment and its consumption often change, it was concluded that the value of the coefficient should be considered as variable. Its value depends on temperature and pressure. It is shown that changes in the heat transfer coefficient over time have a strong effect on the temperature distribution in the component.

The normative documents [7, 8], which are officially recognized in the industry, describe the limiting conditions of heat transfer in the elements of turbines and methods of their calculation. The authors of [9, 10] were guided by these methods and instructions when estimating the residual life and prolongation of operation of steam turbine housings and rotors, valves and other parts of power units.

In [9], the limiting heat transfer conditions for the rotor during cold, uncooked and hot starts are calculated, which change over time during the entire start-up period. Limit heat transfer conditions were calculated according to [7]. Also, when calculating them, the authors take into account changes in parameters on variable modes of operation.

In works [9, 10] the estimation of a resource of details of turbine installations, by means of the described technique of calculation of a thermal condition of these details at characteristic operating modes was offered. The limit conditions of heat exchange at the control points were calculated, which are shown in the calculated geometric models, in which the voltage intensity ranges for all periods of starts from different thermal states were determined. However, this approach to determining the resource

of parts of turbines involves the human factor and, therefore, requires a lot of time to calculate the boundary conditions of I-IV kind. Note that it is not possible to determine with sufficient accuracy the boundary conditions of the I-IV kind for objects that have a complex geometric shape. It is also worth noting the design changes in the details of turbines, which occurred during the entire service life, which can not be taken into account with sufficient accuracy using the method described in [7-10].

Task statement. After a detailed analysis of recent research and publications, it was concluded that the above methods and approaches to determining the life of turbine elements and valves are time consuming in calculating boundary conditions and are not accurate for objects of complex geometric shapes.

The aim of this work is to develop an alternative method for determining the resource indicators of high-temperature elements of turbines, based on the replacement of time-consuming process of calculating the boundary conditions of heat transfer by modeling the dynamics of wet steam flow on the example of main steam power plants. An approach to determining the distributions of pressures, temperatures and velocities of the environment by the volume of the studied object, which is necessary for further calculation of the stress-strain state and resource indicators.

Outline of the main material of the study. The system of "fresh" steam pipelines consists of four parallel main steam pipelines.

Each of the main steam pipelines connects the steam generator (SG) with its shut-off and control valve of the turbine [11]. The tracing of fresh steam pipelines is shown in Figure 1.

The numbering of steam mains corresponds to the numbers of steam generators. Nominal parameters of steam in the system of steam pipes of "fresh" steam during operation of the power unit with nominal load [12] are presented in table 1.

The list of controlled parameters of the system is given in table 2 [12]. The list of parameters will be used to verify the data obtained.

Table 1

Nominal parameters of "fresh" steam

| Parameter Name | Value |
|--|--------------|
| Vapor pressure after steam generator, MPa | 6,3 |
| Vapor pressure before shut-off and control valve, MPa | 5,88 |
| Steam temperature before shut-off and control valve, °C (K) | 274 (547) |
| Humidity of steam in front of the turbine, % | 0,5 |
| Steam consumption from steam generator, t / h | 5870 |
| Steam consumption from steam generator to superheater, t / h | 510 |

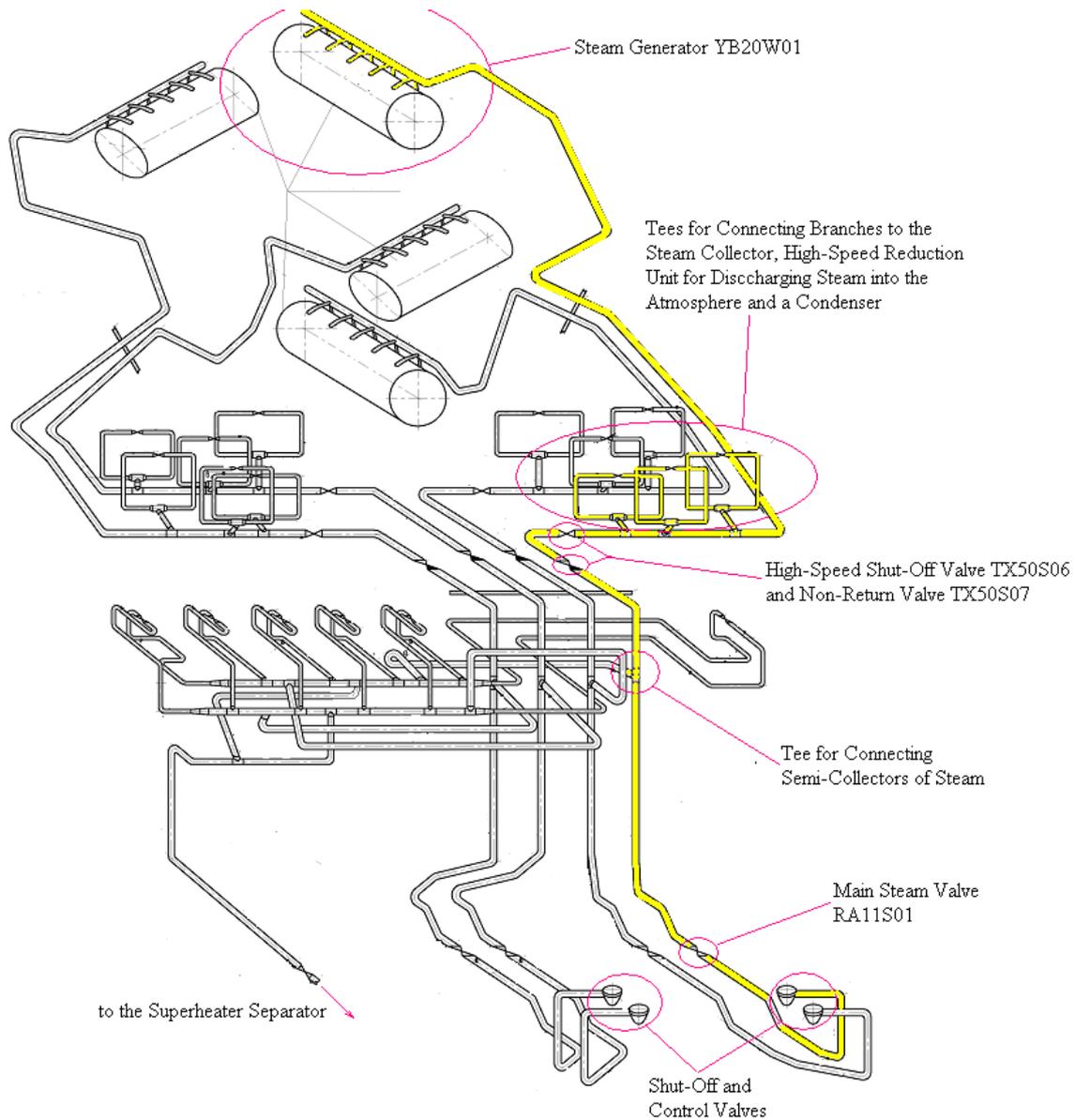


Fig. 1. Tracing of “fresh” steam pipelines [13]

Table 2

Nominal parameters of “fresh” steam

| Parameter Name | Nominal value | Place of output of information |
|--|---------------|--------------------------------|
| Vapor pressure after steam generator, MPa | 6,3 | Block control panel |
| Steam pressure in front of the main steam valve, MPa | 6,27 | On the spot |
| Steam pressure after the main steam valve, MPa | 6,27 | On the spot |

When equipping the system of fresh steam pipelines with control and measuring equipment, a minimum number of devices is installed on site.

As can be seen from the above list of controlled parameters (Table 2), control of gas dynamics of steam in steam pipelines is carried out only at three points, which is clearly not enough to understand the "full picture" of the processes occurring in them. Since the non-design equipment of the NPP steam pipeline system with control and measuring devices

is controlled by the relevant normative documents, interference at the physical level in the design of the steam pipeline is impossible. Therefore, it is advisable to further determine the state of the metal of steam pipelines and fittings to conduct a set of numerical experiments based on modeling the flow of wet steam in the steam distribution system of a nuclear power plant with turbine K-1000-60 / 3000.

FlowVision 3.12.01 software package was used to study gas dynamics in steam pipelines. The geometric

model was created in the 3D modeling system SolidWorks (Figure 2).

The mathematical model includes the laws of conservation of energy, mass, momentum, equations of state of liquid or gas, various closing relations, boundary and initial conditions [14].

The solution of the above equations is based on the finite volume method, which involves their integration by the volume of the cells of the calculation grid. By Gauss's theorem for an arbitrary vector or tensor quantity:

$$\int(\nabla \cdot F) d\Omega = \sum (F_i \cdot n_i) \cdot \Delta S_i, \quad (1)$$

where Ω – cell volume,

ΔS_i – the area of the i-th face of the cell.

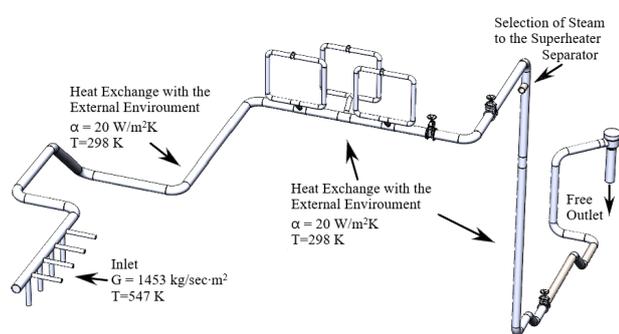


Fig. 2. Estimated scheme of the steam pipeline YB20W01 from the steam generator №2

Thus, when integrating the solvable equations in the cells, the summation of the flows of mass, momentum, energy and turbulent quantities calculated on the faces of the cells is performed.

The parameters obtained at Unit № 2 of Khmel'nitsky NPP were taken as initial and limit conditions: humid steam temperature $t = 274.3^{\circ}\text{C}$; vapor pressure after steam generator $P = 6.3 \text{ MPa}$; the degree of dryness of the vapor $x = 0.995$; steam consumption from all steam generators $G = 5870 \text{ t/h}$; roughness for the studied pipes 10^{-4} m .

In this problem we need to determine the distribution of velocities, temperatures and pressures. The task was solved in a 3-dimensional, stationary setting, using a model of fully compressible fluid. During the trial calculations, the parameters of the calculation model (time step, conditions of adaptation of the calculation grid) were specified, which allowed to optimize the calculation and get a good match with the experimental data obtained directly at the station.

Data on the 3-D gas-dynamic structure of the flow, the distribution of velocities in the flow, temperature fields, pressure distributions were obtained. Analysis of the results of numerical simulations made it possible to study in detail the gas-dynamic characteristics

of the flow of wet steam through steam pipelines. Numerical modeling allowed to estimate the influence of steam pipe geometry on gas flow dynamics.

Given the high requirements for computer power and the considerable duration of calculations, it was decided to investigate only certain sections of one steam pipeline, which are equally present in each of the four. The adopted measure has made it possible not only to reduce the time and resources spent on research of the full task, but also is a very reliable method of predicting changes in pressure in similar sections of steam pipelines. The linear change of steam parameters on straight sections of steam pipelines was also taken into account.

As a result, of the conducted numerical experiments the distributions of temperatures, pressures and speeds of steam at movement on the investigated sites of steam pipelines are received.

Based on the conducted numerical experiments, graphs of pressure drop on each of the four steam pipelines were constructed. Figure 3 shows the curve of the pressure drop of steam for the steam pipe YB20W01 from the steam generator №2.

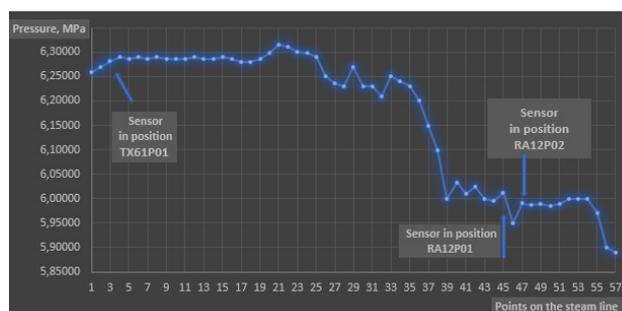


Fig. 3. Pressure drop in the steam line YB20W01 from the steam generator №2

As can be seen from Figure 3, the indicators of the sensors coincide with the obtained data of numerical experiments performed on the basis of the developed mathematical model. Thus, the developed mathematical model of wet steam gas dynamics on the volume of the studied steam pipeline with sufficient adequacy reflects the real characteristics of the coolant and can be used in further calculations to determine the stress-strain state of high-temperature elements of the turbine steam distribution system and determine long-term strength and metal life.

Conclusions. As a result of the simulation of the process of wet steam flow from the steam generator №2 through steam pipelines to the check valve on the power unit №2 of Khmel'nitsky NPP, data on the distribution of pressures, temperatures and velocities of the environment by steam volume. The adequacy of the numerical model and the correctness of the modeling were verified by

comparing the calculated results with the KhNPP data. Comparison of research results and real data gave a satisfactory match. The average relative error of the model is about 5%. The developed simulation model is

adequate and can be used to calculate the parameters of steam flow in steam pipelines. In the future, the obtained data will be used to determine the residual life of the main NPP steam pipelines.

Bibliography:

1. Energy: history, present and future. T3. Development of thermal and nuclear energy. Bazeev ET, Bileka BD, Vasiliev EP et al. K., Ltd. "Editorial Board". *Energy: history, present and future*. 2008. 528p.
2. ND MPE of Ukraine. Control of metal and extension of service life of the main elements of boilers, turbines and pipelines of thermal power plants. SOU-N MPE 40.17.401: 2004. Officer. view. K. : GRIFRE: *Ministry of Fuel and Energy of Ukraine*, 2005. 76 p.
3. Analysis of approaches to the assessment of thermal and stress-strain state of NPP steam pipeline elements. Bednarska IS, Ryndyuk DV Scientific notes of *TNU named after VI Vernadsky. Series: technical sciences*. Volume 30 (69) Part 2 № 2 2019. pp. 12-16.
4. A. Marek, J. Okrajni, Local stress-strain behavior of high-temperature steam valve under transient mechanical and thermal loading, *Journal of Materials Engineering and Performance*, 23, 1 (2014) 31-38. DOI: 10.1007 / s11665-013-0744-3
5. J. Okrajni, W. Essler, "Computer models of steam pipeline components in the evaluation of their," *J. Achiev. Mater. Manuf. Eng.*, 2010, 39 (1), pp. 71–78.
6. Marek, Anželina, "The Impact of the Heat Transfer Coefficient on High-Temperature Distributions in Steam Valve," *Oxide Materials for Electronic Engineering – Fabrication, Properties and Application*, 01 Feb 2016, Vol. 246, pages 217 – 220. DOI: 10.4028 / www.scientific.net / SSP.246.217
7. RTM 24.020.16-73. Stationary steam turbines. Calculation of temperature fields of rotors and cylinders of steam turbines by the method of electromodeling. M., 1973. № VK-002/3209. 104 s.
8. RD 34.17.440-96. Methodical instructions on the procedure for carrying out work in assessing the individual life of steam turbines and extending their service life beyond the park resource. M., 1996. 98 p.
9. Geometric model and boundary conditions of heat exchange of the high-pressure rotor of the T-100-130 turbine of PJSC Kharkiv CHP-5. O. Yu. Chernousenko, Butovsky LS, Peshko VA, Moroz OS *Bulletin of NTU "KhPI". Series: Power and heat engineering processes and equipment*. Kharkiv: NTU "KhPI", 2017. № 11 (1233). P.16-23.
10. Estimation of the individual life of cast housings of automatic safety valves of power units with a capacity of 200 MW. O.Yu. Chernousenko, DV Ryndyuk, V.A. Peshko, V.Yu. Horyazhenko. *Bulletin of NTU "KhPI". Series: Energy and heat engineering processes and equipment*, № 13 (1289) 2018. P. 26-32.
11. 43-923.203.007.BD.05 Khmelnytsky NPP. Power unit №2. YAPVU database. Part 5. *Technological systems of the second circuit*.
12. Khmelnytsky NPP. Power unit № 2. Fresh steam system (TX, RA). *Technical description*. № 2. ТЦ.0245.ТО-01.
13. Steam turbine K-1000-60 / 3000. Operating Instructions. *Technical description*. № 2ТЦ.0244.ТО-01.
14. FlowVision. Version 3.09.04. User Guide [Electronic resource]. – Access mode: <https://flowvision.ru/index.php/public-downloads/category/8dokumentatsiyaflowvision?download=112:3-09-04-pdf-enu>

Риндюк Д.В., Беднарська І.С. МОДЕЛЮВАННЯ ГАЗОДИНАМІКИ ПАРИ В МАГІСТРАЛЬНИХ ТРУБОПРОВОДАХ АЕС

У статті розглянуто процес руху вологої пари магістральними паропроводами атомних електростанцій. Розглянуто систему магістральних паропроводів, яка призначена для транспортування пари від парогенератора до циліндра високого тиску турбіни. Досліджено газодинамічні властивості середовища, що рухається цими паропроводами. Проведено моделювання процесу потоку вологої пари від одного з парогенераторів. Завдання представлено в тривимірному стаціонарному положенні з використанням моделі повністю стисливої рідини. У статті наведено результати першого етапу комплексу чисельних експериментів. Отримано хороше узгодження з даними контрольно-вимірювальних приладів, розташованих на паропроводах енергоблоку №2 атомної електричної станції України. Результатом є тривимірна газодинамічна структура потоку, розподіл швидкостей у потоці, температурні поля, розподіл тиску. Аналіз результатів чисельного моделювання дає змогу детально вивчити газодинамічні характеристики течії вологої пари паропроводами. На основі чисельного моделювання можна оцінити вплив геометрії паропроводу на динаміку газового потоку. За отриманими результатами побудовано графіки падіння тиску на кожному з чотирьох паропроводів у характерних точках розрахункових схем. В результаті моделювання процесу надходження вологої пари від парогенератора №2 по паропроводах до зворотного клапана на енергоблоці №2 АЕС отримані дані про розподіл тиску, температури і швидкості середовища. Адекватність чисельної моделі та правильність моделювання перевірено шляхом порівняння результатів розрахунків з даними АЕС. Порівняння результатів досліджень і реальних даних показало задовільний збіг. Розроблена імітаційна модель є адекватною і може бути використана для розрахунку параметрів потоку пари в паропроводах.

Ключові слова: атомна електростанція, паропроводи, газодинаміка, математичне моделювання.

УДК 662.769

DOI <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2024.4/39>**Шахбазов І.О.**Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»**Сірий О.А.**Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСУ ГОРІННЯ ВОДНЕВМІСНОГО ПАЛИВА В ПРЯМОТОЧНОМУ ПАЛЬНИКУ КРУГЛОГО ПЕРЕТИНУ

У представленій роботі наведено результати дослідження процесу горіння газоподібного водневмісного палива – аміаку за допомогою математичного моделювання. З метою досягнення низьковуглецевого розвитку держави та посилення енергетичної безпеки, передбачається використання безвуглецевого палива на основі водню. Відомо, що з часів промислової революції спалювання було основним методом перетворення енергії для людської діяльності, включаючи виробництво електроенергії та транспорт. На сьогоднішній день ці сектори продовжують значною мірою покладатися на вуглеводневе паливо. Як наслідок, найбільший абсолютний приріст викидів вуглекислого газу у 2022 році був від виробництва електричної та теплової енергії. Таким чином, утворення значної частини викидів CO₂, що є головним винуватцем глобального потепління, підриваючи боротьбу зі зміною клімату, змушує рухатись у напрямку декарбонізації. Необхідність декарбонізації враховується програмними документами, у тому числі державними стратегіями, які не лише застерігають, а й забороняють надмірне утворення забруднюючих речовин та стимулюють популяризацію безвуглецевих технологій в енергетичних секторах. Для досягнення майбутніх цілей вуглецево-нейтральної системи необхідний інноваційний розвиток технологій спалювання палива. Однією з найбільш ефективних технологій горіння, яка дозволить використовувати паливо різної калорійності та зменшити викиди парникових газів, є струменево-нішева технологія, розроблена в Київському політехнічному інституті. Проведено дослідження процесів гідродинаміки і сумішоутворення аміаку і повітря у пальнику циліндричної форми з перпендикулярним введенням палива у потік окисника. За результатами математичного моделювання проаналізовано розподіл температур, швидкості та концентрацій, які свідчать про потенціал аміачного палива. Отримані параметри відповідають 10 кВт теплової потужності. Однак використання аміаку при спалюванні не позбавлене проблем, включаючи низьку швидкість полум'я, вузькі межі займистості, схильність до утворення NO_x. Таким чином, подальше впровадження аміаку в якості палива в енергетиці та промисловості потребує проведення комплексних досліджень робочого процесу горіння.

Ключові слова: безвуглецеве паливо, водневмісне паливо, аміак, декарбонізація, моделювання, пальниковий пристрій, вуглекислий газ, екологія, гідродинаміка, сумішоутворення.

Постановка проблеми. З часів промислової революції спалювання було основним методом перетворення енергії для людської діяльності, включаючи виробництво електроенергії та транспорт. На сьогоднішній день ці сектори продовжують значною мірою покладатися на вуглеводневе паливо [1]. Таким чином, значна частина викидів вуглекислого газу (CO₂) виробляється через ці сектори, що є головним винуватцем глобального потепління, підриваючи боротьбу зі зміною клімату.

Найбільший абсолютний приріст викидів CO₂ у 2022 році був від виробництва електричної та теплової енергії [2]. При збільшенні глобального попиту на електроенергію на 2,7%, викиди в енер-

гетичному секторі зросли на 1,8% (або 261 Мт), досягнувши історичного максимуму в 14,6 Гт.

У подоланні назрілої проблеми та виконанні екологічних зобов'язань ключовим рушієм видається декарбонізація.

Декарбонізація промислового й енергетичного сектору призводить до поступового скорочення споживання вуглецю та його заміни іншими видами. Програмним документом, який враховує необхідність декарбонізації, є нова Енергетична стратегія України на період до 2050 року [3], згідно якої енергетичний сектор має бути максимально наближений до кліматичної нейтральності.

Майбутнє безвуглецевого виробництва електроенергії залежить головним чином від вико-

ристання відновлюваних, низьковуглецевих або безвуглецевих видів палива, які можуть задовольнити потребу в енергії, мінімізуючи вплив на навколишнє середовище.

Аналіз останніх публікацій досліджень і публікацій. Аміаку (NH_3) приділяється все більша увага як одному з найпривабливіших енергоносіїв через його безвуглецеву природу та створену надійну інфраструктуру для його зберігання і розподілу.

Останніми роками використання аміаку включає його безпосереднє використання в якості палива [4–8].

Аміак має здатність горіти і, оскільки молекула NH_3 не містить вуглецю, горить без утворення CO_2 , таким чином відновлюючи інтерес до аміаку як палива. Це можна побачити зі стрімкого збільшення наукових публікацій, пов'язаних із спалюванням аміаку, після оглядової статті Kobayashi та ін. [4].

Зокрема, описується дорожня карта до економіки на основі аміаку в працях Natalia Morlanés та ін. [5], де технології аміаку розглядаються з акцентом на поточні обмеження та останні досягнення. Douglas MacFarlane та ін. [6] передбачають виробництво відновлюваного аміаку в масштабах, які є значними з точки зору глобального використання викопного палива.

N. Iki та ін. [7] створили газотурбінну установку потужністю 41,8 кВт, використовуючи аміак у якості основного палива. Після дослідно-конструкторських і ремонтних робіт постачання аміаку, вони провели демонстраційне випробування виробництва електроенергії з використанням аміачного палива. Основними цілями ефективності було збереження сумісності з існуючою системою виробництва електроенергії та мінімізація викидів оксидів азоту (NO_x).

Компанія Mitsubishi Power оголосила про розробку аміачної газової турбіни потужністю 40 МВт у березні 2021 року та хоче вивести її на комерційне виробництво у 2025 році після проходження робочих процесів горіння та відповідних випробувань [8].

Вагомий внесок у сфері розвитку пального пристроїв здійснено вітчизняними вченими [9], зокрема розробка і впровадження у промислового масштабі струменево-нішевої технології спалювання. Результати промислового впровадження технології дозволили накопичити значний обсяг технічної інформації та дали можливість попередньої екологічної оцінки при модернізації газоспалювального обладнання.

Водночас інновації в галузі перетворення енергії просуваються швидше, ніж у минулому, і для підтримки цих технологій необхідні суттєві науково-дослідні роботи. Через відмінності у властивостях горіння аміаку відносно вуглеводню, можуть знадобитися певні модифікації. Незважаючи на численні переваги, аміак має кілька бар'єрів і прогалин у дослідженнях, які потребують вирішення, перш ніж його використовувати в пристроях для спалювання.

Постановка завдання. Завданням даної роботи є дослідження процесу горіння газоподібного аміаку за допомогою математичного моделювання з метою передбачення можливості використання аміаку як безвуглецевого палива на основі водню та досягнення низьковуглецевого розвитку держави.

Виклад основного матеріалу. Методи і матеріали дослідження. Об'єктом дослідження є закономірності процесів сумішоутворення і гідродинаміки газоподібного аміаку і повітря в пальному пристрої циліндричної форми, в центрі якого розташовано трубку подачі палива з отворами на бічній стінці.

У роботі прийняті наступні передумови. Сталість профілю швидкості повітря на вході в канал і газоподібного аміаку в газоподавальних отворах. Сталість інтенсивності турбулентності на вхідній ділянці каналу. В загальному постановка задачі виконана у тривимірному просторі за стаціонарних умов проходження процесу.

Модель горіння описано переносом речовин з підключенням об'ємних реакцій. Нижче зведено рівняння турбулентної стисливої течії. Збереження маси, імпульсу та енергії описано в рівняннях (1), (2) і (3) відповідно, які можна знайти в [10].

Збереження маси за рівнянням нерозривності:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla(\rho \bar{u}) = 0 \quad (1)$$

де ρ – густина рідини, t – час, $\bar{u} = f(u, v, w)^T$ – швидкість безперервної фази газової суміші.

Збереження імпульсу розглядається через рівняння Нав'є-Стокса:

$$\frac{\partial(\rho \bar{u})}{\partial t} + \nabla(\rho \bar{u} \cdot \bar{u}) = -\nabla p + \nabla \tau \quad (2)$$

де p – статичний тиск, τ – тензор напружень.

Рівняння енергії через питому ентальпію:

$$\frac{\partial(\rho h)}{\partial t} + \nabla(\rho \bar{u} h) = \nabla \left(k_{eff} \frac{\nabla h}{c_p} \right) + \nabla \bar{J}_h \quad (3)$$

де h – питома ентальпія, $k_{eff} = \lambda$ – теплопровідність газу, c_p – питома теплоємність при постійному тиску, \bar{J}_h – дифузійний потік ентальпії.

Також розглянуто модель ідеального газу для стисливої течії:

$$\rho = \frac{p}{\frac{R}{M} T} \quad (4)$$

де R – універсальна газова стала, $\frac{1}{M} = \sum_{i=1}^N \frac{Y_i}{M_i}$ – середня молярна маса суміші, T – температура.

Використовуючи нескладну геометрію пальника, створено розрахункову сітку, що схематично показано на рис. 1. Загальна довжина каналу складає 1,02 м. Для подачі палива передбачено 8 отворів діаметром 3 мм. Згідно з аналізом чутливості сітки, кінцевий розмір сітки становив 212 021 комірок.

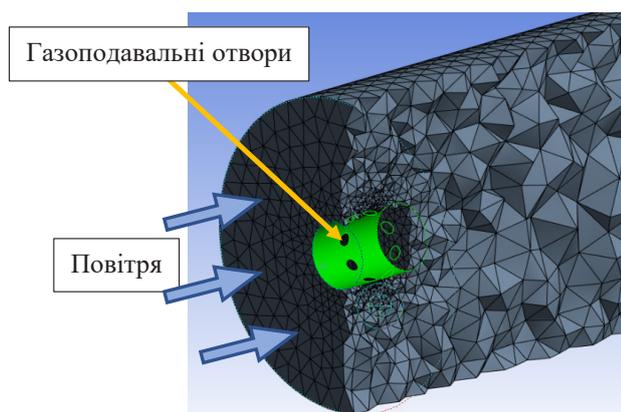


Рис. 1. Розрахункова сітка пальника

Задача розв'язувалася чисельно за допомогою CFD моделювання. Моделювання виконано на основі рівнянь Нав'є-Стокса усереднених за Рейнольдсом (Reynolds-averaged Navier-Stokes) з моделлю турбулентності k-ε Realizable.

Для одночасного врахування турбулентного змішування і швидкості хімічних реакцій використовується модель Finite Rate/Eddy Dissipation, яка поєднує у собі скінченну швидкість (Finite Rate) та вихрове розсіювання (Eddy Dissipation), що дозволяє краще контролювати споживання реагентів. Чиста швидкість реакції приймається як найменша з цих двох швидкостей.

Розв'язувач на основі тиску використовувався зі схемою інтерполяції Coupled для зв'язаного алгоритму швидкість–тиск і просторовою дискретизацією другого порядку.

На відміну від розділеного алгоритму, зв'язаний алгоритм на основі тиску розв'язує пов'язану систему рівнянь, що складається з рівнянь імпульсу та рівняння нерозривності на основі тиску.

Оскільки рівняння імпульсу і нерозривності розв'язуються тісно пов'язаними способами, швидкість збіжності розв'язку покращується порівняно з розділеним алгоритмом. Однак вимоги до пам'яті обчислювальної техніки збіль-

шуються в 1,5–2 рази, оскільки в пам'яті розрахунку повинна зберігатися дискретна система всіх рівнянь імпульсу і нерозривності на основі тиску під час вирішення полів швидкості і тиску (а не лише одне рівняння, як у випадку із розділеним алгоритмом) [10].

Результати моделювання. На рис. 2, 3, 4 показано відповідно розподіл температури та швидкості під час окиснення аміаку в осьовому перерізі каналу, а також в семи поперечних перетинах каналу: перший перетин проходить через центр отворів подачі палива ($x=10\text{мм}$), останній – на місці вихлопу каналу ($x=1020\text{мм}$), інші розміщено на відстанях $x=120, 220, 420, 620, 820\text{мм}$.

Введення газоподібного аміаку здійснюється перпендикулярно набігаючому потоку повітря, який зносить струмені палива. На початку струмені палива утворюють восьмипроменеву зірку, а з середини каналу розподіл продуктів згоряння більш-менш рівномірний (рис. 2б). Зона високих температур спостерігається на відстані 0,2–0,3 м від торця трубки пальника і становить близько 2000К.

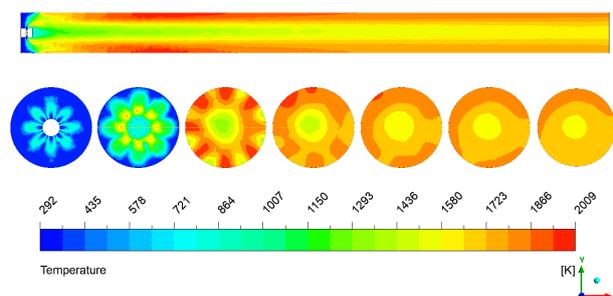


Рис. 2. Розподіл температури продуктів згоряння в осьовому (а) і поперечних (б) перетинах каналу при $u_{\text{пов}}=1$ м/с, $\alpha=1,4$

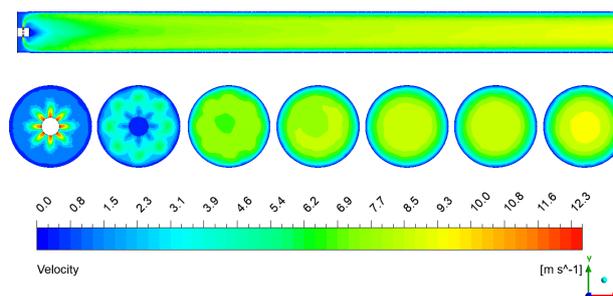


Рис. 3. Розподіл швидкості потоку в осьовому (а) і поперечних (б) перетинах каналу при $u_{\text{пов}}=1$ м/с, $\alpha=1,4$

Створена математична модель була попередньо перевірена шляхом спалювання метану з повітрям, результати узгоджуються з відповідними роботами [11].

Особливістю представленої конструкції циліндричного пальника має у собі наявність зони

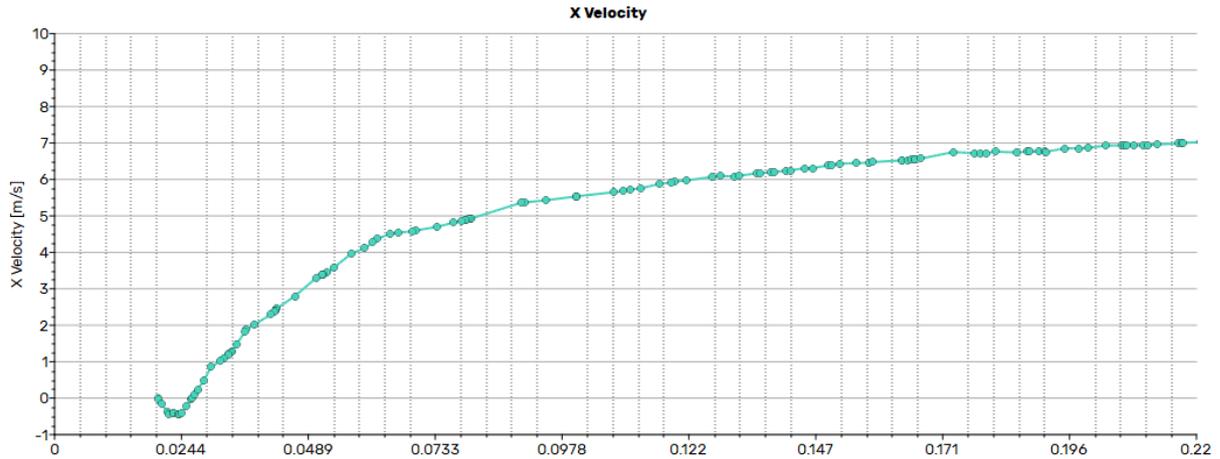


Рис. 4. Проекція швидкості потоку вздовж осі сліду за трубою подачі палива при $u_{\text{пов}}=1$ м/с, $\alpha=1,4$

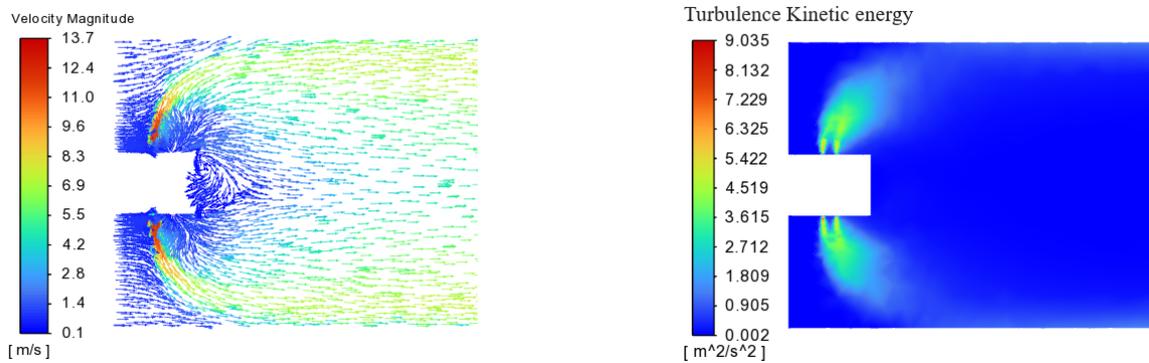


Рис. 5. Розподіл векторів швидкості потоку (а) і кінетична енергія турбулентності (б) в осьовому перетині каналу при $u_{\text{пов}}=1$ м/с, $\alpha=1,4$

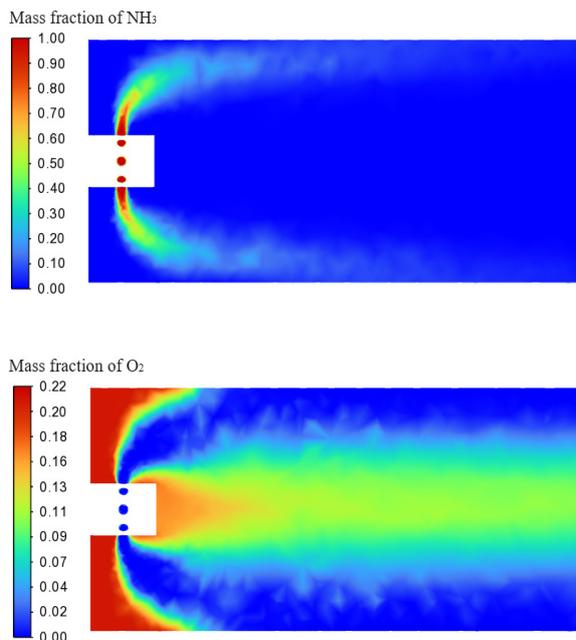


Рис. 6. Розподіл концентрацій газоподібного аміаку (а) і кисню (б) в осьовому перетині каналу при $u_{\text{пов}}=1$ м/с, $\alpha=1,4$

зворотних токів, за аналогією роботи [11]. Цю зону можна спостерігати на епюрі розподілу швидкості потоку в осьовому перетині каналу (рис. 3а), на графіку залежності осьової швидкості потоку від координати вздовж осі каналу (рис. 4; $x=0,02-0,025$ м), а також на векторній діаграмі (рис. 5а).

На рис. 5 показано вектори швидкості потоку і поле турбулентності в межах початкової ділянки каналу. В цих же межах представлено споживання реагентів внаслідок хімічної реакції у вигляді концентрацій газоподібного аміаку і кисню, що показано на рис. 6.

Стехіометричне відношення окисника до палива для аміаку становить 3,8 за об'ємом (або 6,1 за масою), що у 2,5 рази менше порівняно з метаном. При цьому концентрація аміаку у паливно-повітряній суміші близько 21%, тоді як метан – 9,5% за даних стехіометричних умов.

Процес горіння аміаку залежить не лише від теплофізичних характеристик палива, а й також від геометричних характеристик пальника. Варто

значити, що наявна у даному дослідженні зона зворотних потоків є невелика та може бути збільшена при збільшенні діаметру трубки подачі палива. Цю особливість доцільно використовувати для попереднього підігріву газоподібного палива, оскільки супроводжується теплообміном від більш гарячих газів через торцеву стінку трубки до свіжого палива.

Крім того, для поступового переходу від традиційного газоподібного палива до безвуглецевого водневмісного – аміачного палива, викликає інтерес впровадження двопаливного пальникового пристрою. Представлена модель може бути модифікована наступним чином: додається ще одна трубка більшого діаметру ніж перша ($d_1=15\text{мм}$) для подачі другого газоподібного палива. Однак це питання потребує окремого вирішення внаслідок значної варіації як діаметрів трубок, так і розташування отворів подачі палив.

Висновки. Теплові електростанції, включаючи вугільні електростанції та газові турбіни, є великим джерелом викидів CO_2 , і ефект скорочення викидів вуглецю може бути максимізований, якщо в системах спалювання використовується аміак.

Щоб сприяти декарбонізації енергетичного сектора, використання аміаку як палива безпосередньо, або змішаного з іншими видами палива, може мати значні переваги. Завдяки високій об'ємній щільності енергії (порівняно з воднем) і добре налагодженій виробничій і транспорт-

ній інфраструктурі аміак є привабливим стійким енергоносієм. Однак використання аміаку при спалюванні не позбавлене проблем, включаючи низьку швидкість полум'я, вузькі межі займистості, схильність до утворення NO_x .

Зважаючи на окреслені проблеми, наявних досягнень недостатньо та потрібні розробки, які пом'якшують перешкоди для ефективного та успішного прямого спалювання аміаку. Механізми чистого або спільного з іншими видами палива згоряння аміаку мають бути детально з'ясовані з точки зору хімічної кінетики.

За результатами дослідження спалювання чистого газоподібного аміаку з повітрям визначено параметри сумішоутворення для даної конструкції пальника, які відповідають 10 кВт теплової потужності. При коефіцієнті надлишку повітря 1,4 швидкість палива і окисника становить 1 і 12,5 м/с відповідно. При цьому концентрація аміаку експоненційно спадає від 0,6 до $1,4 \cdot 10^{-18}$ кг/кг вздовж усього каналу по ходу газів.

У фундаментальних дослідженнях слабка займистість аміачно-повітряного полум'я може бути посилена шляхом додавання більш реакційноздатних палив, попереднім нагріванням вхідних газів і підвищенням концентрації кисню. Досліджувана конструкція пальника дозволяє організувати наведені методи посилення займання аміачно-повітряної суміші за незначних модифікацій.

Список літератури:

1. Data and statistics – IEA. Режим доступу: <https://www.iea.org/data-and-statistics/data-browser/?country=WORLD&fuel=Energy%20supply>.
2. CO_2 Emissions in 2022 – Analysis – IEA. Режим доступу: <https://www.iea.org/reports/co2-emissions-in-2022>.
3. Про схвалення Енергетичної стратегії України на період до 2050 року. Розпорядження Кабінету Міністрів України від 21.04.2023 № 373-р. <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/373-2023-p#Text>.
4. Science and technology of ammonia combustion / Н. Kobayashi та ін. Proceedings of the Combustion Institute. 2019. Т. 37, № 1. С. 109–133. <https://doi.org/10.1016/j.proci.2018.09.029>.
5. A technological roadmap to the ammonia energy economy: Current state and missing technologies / N. Morlanés та ін. Chemical Engineering Journal. 2020. С. 127310. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2020.127310>.
6. A Roadmap to the Ammonia Economy / D. R. MacFarlane та ін. Joule. 2020. Т. 4, № 6. С. 1186–1205. <https://doi.org/10.1016/j.joule.2020.04.004>.
7. Micro gas turbine firing ammonia / N. Iki та ін. In Proceedings of the 12th Annual NH_3 Fuel Conference, м. Chicago, IL, 20–23 вер. 2015 р.
8. Mitsubishi Power Commences Development of World's First Ammonia-fired 40MW Class Gas Turbine System – Targets to Expand Lineup of Carbon-free Power Generation Options, with Commercialization around 2025. Mitsubishi Power. <https://power.mhi.com/news/20210301.html>.
9. Abdulin M. Z., Siryi O. A., Kobylanska O. O. Energy-ecological assessment of the boiler equipment modernized with the jet-niche technology. Journal of Mechanical Engineering. 2022. Т. 25, № 3. С. 46–55. <https://doi.org/10.15407/pmach2022.03.046>.
10. Inc. ANSYS. Ansys Fluent Theory Guide. <https://ansyshelp.ansys.com>.
11. Тимощенко О. Б. Розроблення теплофізичних засад спалювання газу в мікрофакельних пальникових пристроях малої потужності: автореф. дис. канд. техн. наук: 05.14.06. Київ, 2020. 174 с.

Shakhbazov I.O., Siryi O.A. MATHEMATICAL MODELING OF THE HYDROGEN-CONTAINING FUEL COMBUSTION PROCESS IN A DIRECT FLOW BURNER WITH ROUND SECTION

The presented work demonstrates the results of the study of the gaseous hydrogen-containing fuel – ammonia combustion process using mathematical modeling. In order to achieve low-carbon development of the state and increase energy security, the use of carbon-free fuel based on hydrogen is assumed, which is caused by the following prerequisite. It is known that since the Industrial Revolution, combustion has been the primary method of energy conversion for human activities, including power generation and transportation. Today, these sectors continue to rely heavily on hydrocarbon fuels. As a result, the largest absolute increase in carbon dioxide emissions in 2022 was from electricity and heat production. Thus, the formation of a significant part of CO₂ emissions, which is the main culprit of global warming, undermining the fight against climate change, forces to move in the direction of decarbonization. The need for decarbonization is taken into account by program documents, including government strategies, which not only warn but also prohibit the excessive formation of pollutants and stimulate the promotion of carbon-free technologies in energy sectors. The innovative development of fuel combustion technologies is necessary to achieve the future goals of a carbon-neutral system. On the way to creating a combustion technology that will allow the use of fuel with different caloric content and reduce greenhouse gas emissions, it was decided to use a burner based on a jet stabilizer developed in the NTUU "Igor Sikorsky KPI". A study of the hydrodynamics processes and the ammonia-air mixture formation in a cylindrical burner with a perpendicular injection of fuel and oxidizer was carried out. The simulation results are recorded in the form of temperatures, speeds and concentrations distributions, which indicate the potential of ammonia fuel. The obtained parameters correspond to 10 kW of thermal power. However, the use of ammonia in combustion is not without problems, including low flame speed, narrow flammability limits, and propensity for NO_x formation. Therefore, the further introduction of ammonia as a fuel in energy and industry requires comprehensive studies of the combustion working process.

Key words: carbon-free fuel, hydrogen-containing fuel, ammonia, decarbonization, simulation, burner device, carbon dioxide, ecology, hydrodynamics, mixture formation.

УДК 624.31

DOI <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2024.4/40>**Шелешей Т.В.**Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»**Беднарська І.С.**Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»**Панченко К.А.**Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»**Федорук Р.О.**Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

АНАЛІЗ СУЧАСНИХ МЕТОДІВ БОРОТЬБИ З ОКСИДАМИ АЗОТУ В ГАЗОВИХ КОТЛАХ

У статті розглядаються різні способи зменшення викидів оксидів азоту в навколишнє середовище при спалюванні природного газу в енергетичних установках різної потужності. Вказано про актуальність розробки та впровадження ефективних методів боротьби з викидами NO_x у газових котлах. Розглянуто активні і пасивні методи зменшення викидів оксидів азоту. Особливу увагу приділено селективному каталітичному відновленню та селективному некаталітичному відновленню, які є найбільш перспективними. Охарактеризовано їхню ефективність: метод селективного некаталітичного відновлення менш ефективний, ніж метод каталітичного відновлення (ККД до 90%), але цей метод дешевший і простіший у використанні. Метод селективного каталітичного відновлення є дуже ефективним методом (ККД до 95%) і використовується на різних промислових підприємствах. Також описані переваги та недоліки технології рециркуляції димових газів в контексті зменшення викидів оксидів азоту. Опасно значний вплив коефіцієнта надлишку повітря на температуру котла та викиди NO_x . Вказано, що метод рециркуляції димових газів пропонує баланс між ефективністю, вартістю та складністю впровадження. Однак дуже важливо підтримувати оптимальний рівень рециркуляції, щоб уникнути погіршення стабільності горіння та ефективності котла. Приведений метод зменшення теплової потужності котла шляхом зменшення швидкості згорання (інтенсивності пального), що може значно зменшити утворення NO_x . Сказано, що шляхом спалювання суміші метану (CH_4) і вуглекислого газу (CO_2) можна зменшити утворення оксидів азоту. Також приведено інші методи зменшення викидів оксиду азоту: використання пальників з низьким вмістом оксиду азоту, використання вибіркового каталітичного відновлення, використання вибіркового некаталітичного відновлення, використання каталізаторів окислення.

Ключові слова: оксиди азоту, енергетика, активні методи, пасивні методи, зменшення викидів, рециркуляція димових газів, каталітичне селективне відновлення, надлишок повітря, каталізатор.

Постановка проблеми. Енергетика – одна з пріоритетних галузей світової промисловості. Електрична енергія необхідна для функціонування як і компаній, так і життя громадян, а також для розвитку окремих регіонів і цілих континентів. Без електрики не можуть працювати автівки, лікарні, школи, фабрики та заводи. Однак використання та збільшення виробництва енергії за рахунок теплових, гідро- та атомних електростанцій призводить до ряду негативних

наслідків, які є зворотною стороною технічного прогресу.

Багато років глави держав не реагували на застереження екологів, які закликали до раціонального використання електростанцій. Після аварії на Чорнобильській АЕС у 1986 році людство по-новому подивилося на ризики, пов'язані з роботою АЕС та інших електростанцій.

Екологічні проблеми електростанцій привертають увагу вчених і громадськості. Вони станов-

лять реальну загрозу, спричиняючи забруднення повітря, виділенню шкідливих димових газів і пилю, забрудненню навколишнього середовища радіоактивними та токсичними відходами виробництва електроенергії, підвищенню середньорічної температури на декілька градусів, виникненню електромагнітних полів.

Екологічні проблеми необхідно вирішувати негайно, інакше наслідки забруднення повітря можуть стати незворотними. Необхідно узгодити збільшення споживання енергії з ризиком забруднення навколишнього середовища та зосередитися на розвитку альтернативних джерел енергії, заснованих на використанні відновлюваних джерел, таких як сонце, вода чи вітер, щоб вирішити проблему поводження з відходами.

Тільки комплексний підхід до питань охорони навколишнього середовища на міжнародному рівні дозволить вирішити екологічні проблеми електростанцій, тим самим захистивши навколишнє середовище та життя і здоров'я людей.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Оксиди азоту (NO_x), продукти згоряння палива, представляють значну проблему для навколишнього середовища. Вони піддаються фотохімічним реакціям, які призводять до утворення смогу та кислотних дощів, негативно впливають на здоров'я людини та викликають респіраторні захворювання [1].

Головним джерелом викидів NO_x є теплова енергетика. Загальна кількість цих забруднюючих речовин складає 0,8 кг на 1 тону продукту [2]. NO_x – це назва оксидів нітрогену – NO і NO_2 , для яких встановлено санітарно-гігієнічні обмеження. Під час згоряння палива приблизно 90% об'єму оксидів нітрогену утворюється у формі нітрогену (II) оксиду – NO . Решта 10% об'єму припадає на нітрогену (IV) оксид – NO_2 . Однак в ході хімічних реакцій в атмосфері значна частина NO перетворюється на NO_2 – набагато більш небезпечну речовину, що підтверджується значеннями санітарно-гігієнічних нормативів ДСП-201-97.

У цьому контексті розробка та впровадження ефективних методів боротьби з викидами NO_x у газових котлах є актуальним завданням великої наукової та практичної важливості [2].

Постановка завдання. Метою даної статті є аналіз сучасних методів боротьби з оксидами азоту в **газових котлах**, оцінка їх ефективності та перспектив застосування та внесення власних пропозицій щодо вирішення проблеми.

Виклад основного матеріалу. Було доведено, що викиди оксиду азоту (NO_x) є основною причи-

ною забруднення повітря, яке негативно впливає на здоров'я людини та навколишнє середовище. Існує два основні методи зменшення викидів NO_x : активний і пасивний [2].

Активні методи використовують технології, спеціально розроблені для зменшення викидів NO_x , тоді як пасивні методи використовують двигуни або пальники, які природним чином створюють менші викиди NO_x . У цій статті ми розглянемо плюси та мінуси кожного методу та порівняємо їхню ефективність у зменшенні викидів NO_x .

Активні методи зниження викидів NO_x включають використання спеціальних технологій зниження цих викидів. Однією з таких технологій є використання селективного каталітичного відновлення (СКВ), яке передбачає впорскування розчину у вихлопну систему для перетворення NO_x на азот і воду [3]. Іншим активним методом є рециркуляція вихлопних газів (РВГ), при якій частина вихлопних газів рециркулює в двигун для зниження температури та концентрації кисню в камері згоряння, тим самим зменшуючи викиди NO_x [4]. Нарешті, оптимізація системи впорскування палива передбачає коригування часу та кількості впрыскування палива для зменшення викидів NO_x .

Пасивні методи зменшення викидів NO_x включають використання двигунів або пальників, які природно виробляють менші викиди NO_x . Одним із методів є використання двигунів з бідним спалюванням, які працюють із вищим співвідношенням повітря та палива, що призводить до нижчих температур згоряння та нижчих викидів NO_x [5]. Іншим пасивним методом є використання пальників із низьким викидом оксидів азоту у промислових котлах, які використовують комбінацію палива та повітря для зменшення викидів NO_x [6]. Пасивні методи, як правило, недорогі та не потребують обслуговування, що робить їх придатними для застосування з низьким попитом.

Хоча і активні, і пасивні методи можуть ефективно зменшити викиди NO_x , між ними є деякі ключові відмінності. Активні методи, як правило, більш ефективні для зменшення викидів оксидів азоту, ніж пасивні методи. Однак активні методи також дорожчі в установці та обслуговуванні, ніж пасивні методи. З іншого боку, пасивні методи більше підходять для енергетичних установок із низьким попитом, тоді як активні методи більше підходять для тих, які користуються високим попитом серед споживачів. Вибираючи між активним і пасивним методами зменшення викидів NO_x , важливо враховувати конкретні вимоги кожного застосування.

У [7] автори розглядають різні методи очищення викидів оксиду азоту (NO_x) від стаціонарних джерел. Особливу увагу приділено селективному каталітичному відновленню (СКВ) та селективному некаталітичному відновленню (СНКВ), які є найбільш перспективними. У статті наведено огляд доступних методів очищення викидів NO_x , зокрема:

- основні методи: низькотемпературне спалювання, факельне горіння, рециркуляція диму;
- вторинні методи: адсорбція, каталітичне відновлення (СКВ), селективне некаталітичне відновлення (СНКВ).

Каталітичне відновлення (СКВ) – це метод очищення викидів оксидів азоту, який передбачає відновлення NO_x до азоту (N_2) і води (H_2O) у присутності каталізатора за допомогою відновника (зазвичай аміаку). СКВ є дуже ефективним методом (ККД до 95%) і використовується на різних промислових підприємствах.

Селективне некаталітичне відновлення (СНКВ) – це ще один метод очищення викидів оксидів азоту, який включає введення NO_x у пуч або димохід разом із відновником (зазвичай аміаком або ціаністим воднем). СНКВ менш ефективний, ніж метод каталітичного відновлення (ККД до 90%), але цей метод дешевший і простіший у використанні.

Зведемо всі переваги та недоліки вищезгаданих методів до таблиці 1.

Таблиця 1

Порівняння методів селективного каталітичного та некаталітичного відновлення

| | Критерії оцінки | Метод СКВ | Метод СНКВ |
|---|------------------------|-----------|-------------|
| 1 | Ефективність | до 95% | до 90% |
| 2 | Вартість | висока | низька |
| 3 | Складність | складний | простий |
| 4 | Каталізатор | потрібен | не потрібен |
| 5 | Температурний діапазон | широкий | обмежений |

Отже, до переваг методу СНКВ можна віднести: низьку вартість порівняно з іншими методами, простоту у використанні, відносно високий ККД (до 90%) і каталізатор не потрібен.

Головним недоліком цього способу є те, що він підходить не для всіх типів котлів. Також варто наголосити, що при використанні селективного некаталітичного відновлення можуть виникати такі побічні продукти, як N_2O (закис азоту). А ще одним недоліком є обмеження щодо діапазону температур.

У роботі [8] досліджено ефективність рециркуляції димових газів (РДГ) щодо зменшення викидів оксиду азоту (NO_x) від газових котлів. Автори використовують моделювання обчислювальної гідрогазодинаміки (CFD) для аналізу впливу різних витрат надлишкового повітря та швидкостей рециркуляції димових газів на температуру спалювання та утворення NO_x .

Показано, що коефіцієнт надлишку повітря має значний вплив на температуру котла та викиди NO_x . У міру збільшення надлишку повітря середня температура спочатку підвищується, а потім знижується, оскільки надлишок кисню поглинає тепло. Це зниження температури призводить до зменшення утворення оксидів азоту.

Метод рециркуляції димових газів ефективно знижує температуру печі шляхом введення інертних димових газів і таким чином пригнічує теплове утворення NO_x . Дослідження показало зниження викидів оксидів азоту на 70% (від 140 мг/м^3 до 40 мг/м^3) при коефіцієнті надлишку повітря 1,1 і 20% РДГ.

Перевагами рециркуляції димових газів для зменшення викидів NO_x є: ефективне скорочення вищезгаданих викидів: РДГ може значно зменшити утворення NO_x шляхом зниження максимальної температури згоряння в топці; відносно проста реалізація: порівняно з іншими технологіями контролю NO_x , РДГ може бути реалізована шляхом модифікації існуючих котельних систем; економічна ефективність: технологія часто розглядається як економічно ефективний підхід до скорочення викидів NO_x .

Недоліками рециркуляції димових газів є: обмежена ефективність при високих значеннях УЗВ: надмірне використання РДГ може знизити концентрацію кисню в топці, що призведе до неповного згоряння палива та збільшення викидів оксиду вуглецю; можливість нестабільності полум'я: високі значення РДГ можуть спричинити нестабільний стан полум'я, що вплине на роботу та безпеку котла; підвищене енергоспоживання: вентилятор, який використовується для рециркуляції димових газів, потребує додаткової енергії, що призводить до незначного зниження ефективності котла.

Отже, метод рециркуляції димових газів – це встановлений і перевірений метод зменшення викидів NO_x від газових котлів, що працюють на природному газі. Він пропонує баланс між ефективністю, вартістю та складністю впровадження. Однак дуже важливо підтримувати оптимальний рівень рециркуляції, щоб уникнути погіршення стабільності горіння та ефективності котла.

У статті [9] розглядаються різні методи зменшення викидів оксиду азоту при спалюванні природного газу в котлах. Зазначено, що хоча нові котли можуть бути розроблені відповідно до більш суворих стандартів викидів, модернізація існуючих котлів є більш економічно ефективною. У статті розглядаються три основні методи: зменшення об'ємного теплового навантаження; рециркуляція димових газів; спалювання біогазу з використанням CO_2 .

Зменшення теплової потужності котла шляхом зменшення швидкості згоряння (інтенсивності палиника) може значно зменшити утворення NO_x . Дослідження показало, що зниження теплового навантаження топки котла ТГМП-314 до $0,09 \text{ МВт/м}^3$ (приблизно 55% від номінальної потужності) у поєднанні з рециркуляцією димових газів на 17% дозволило скоротити викиди оксидів азоту на 75%.

Про рециркуляцію димових газів повідомляється, що шляхом повернення частини газів згоряння в камеру згоряння максимальна температура полум'я знижується, тим самим зменшуючи теплове утворення NO_x . Дослідження показує, що використання існуючої системи РДГ у водогрійному котлі КВГМ-180 з коефіцієнтом рециркуляції 30% зменшило викиди NO_x на 67%, зберігаючи рівень CO в допустимих межах.

Шляхом спалювання суміші метану (CH_4) і вуглекислого газу (CO_2) можна зменшити утворення оксидів азоту. Дослідження показало, що використання біогазової суміші 76% CH_4 і 24% CO_2 в котлі ДКВР-6,5-13 призвело до викидів NO_x , які відповідають європейським нормам ($63\text{--}76 \text{ мг/нм}^3$). Проте дослідження показує, що навіть нижчі рівні NO_x можуть бути досягнуті в контрольованих лабораторних умовах.

Варто відзначити, що оксиди азоту є основним забруднювачем повітря, спричиняючи смог, кислотні дощі та респіраторні захворювання. В статті [10] було досліджено різні методи зменшення викидів оксиду азоту від котлів: використання палиників з низьким вмістом оксиду азоту; використання вибіркового каталітичного відновлення; використання вибіркового некаталітичного відновлення; використання каталізаторів окислення.

Пальники з низьким вмістом оксиду азоту сприяють поетапному горінню шляхом змішування палива та повітря в кілька етапів, що призводить до зниження максимальних температур полум'я та меншого утворення NO_x .

У системах вибіркового каталітичного відновлення газоподібні продукти згоряння пропускаються через шар каталізатора, у який вводять

аміак. Аміак реагує з NO_x і утворює нешкідливий азот і водяну пару.

Подібно до вибіркового каталітичного відновлення, вибіркоче некаталітичне відновлення передбачає введення відновника (сечовини або аміаку) у верхню камеру печі, де він реагує з NO_x при високих температурах.

А каталізатори окислення допомагають перетворювати CO в CO_2 , але лише в деяких випадках також можуть призвести до незначного зниження викидів NO_x .

Ще одним методом зниження NO_x є мінімізація коефіцієнта надлишку повітря та раціональний розподіл палива. Зменшення коефіцієнта надлишку повітря призводить до зменшення кількості кисню в зоні горіння. А раціональний розподіл палива між палиниками забезпечує більш рівномірне горіння. Таким чином зростає ККД, що призводить до більш повного згоряння палива.

Утворення NO_x може бути зменшено на 20–30%, а в деяких випадках навіть більше. Переваги методу:

- простота впровадження: не потребує значних інвестицій у нове обладнання;
- ефективність: забезпечує значне зниження викидів NO_x ;
- економічність: більша ефективність призводить до економії палива.

Недоліки методу:

- необхідність точного контролю α : для досягнення максимального ефекту важливо точно контролювати α (коефіцієнт надлишку повітря);
- складність раціонального розподілу палива: може знадобитися додаткове обладнання та кваліфікація персоналу;
- можливість утворення інших забруднюючих речовин: надмірне зниження α може призвести до утворення монооксиду вуглецю (CO).

Прикладом застосування цього методу є його впровадження в промислові котельні. Його також можна використовувати в житлових котельнях, але для цього може знадобитися додаткове обладнання.

Висновки. Отже, зменшення викидів NO_x є важливим кроком до покращення якості повітря та захисту здоров'я людини та навколишнього середовища. Як активні, так і пасивні методи можуть ефективно зменшити викиди NO_x , але варто пам'ятати, що кожен має свої переваги та недоліки. Активні методи ефективніші, але дорожчі, пасивні більш доступні, але менш ефективні. При виборі між активним і пасивним методами зниження NO_x для досягнення найбільшої ефективності перевагу надають комбінованому методу.

Список літератури:

1. Вольчин, І.А., Рашепкін І.А. Про Національний план скорочення викидів. Зб. тез доповідей «Вугільна теплоенергетика: проблеми реабілітації та розвитку». 2014. С. 23–26.
2. Сайт Сталій розвиток для України. – Режим доступу : <http://www.sd4ua.org/golovni-temi-stalogo-rozvitku/zabrudnennya-atmosferного-povitrya/> .
3. Варламов Г. Б., Любчик Г. М., Маляренко В. А. . Теплоенергетичні установки та екологічні аспекти виробництва енергії. – К.: ІВЦ Вид-во «Політехніка», 2003. – 232 с.
4. Внуков О.К., Розанова Ф.А. Ціна придушення оксидів азоту рециркуляцією газів на котлах. *Енергетик*. 2007. № 7. С.35-36.
5. Любчик Г. М. Проблеми екології ТЕС. Метод. рек. до вивч. курсу “*Основи екології*”. К.: КПІ, 1995. 24 с.
6. Національний план скорочення викидів від великих енергетичних установок, від 8 листопада 2017 року № 796-р. *Розпорядження, Кабінет міністрів України*. Київ, 99 с.
7. Renu Singh, Ashish Shukla. A review on methods of flue gas cleaning from combustion of biomass. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2014. Vol. 29. P. 855-863. DOI: 10.1016/j.rser.2013.09.005.
8. Ji Yanyan, Zhang Songsong, Wang Kejian, Qi Guoli. Study on combustion and nitrogen oxide emissions of gas boiler. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2020. Vol. 721. 012054. DOI: 10.1088/1757-899X/721/1/012054.
9. Sigal I. Ya., Smikhula A. V., Marasin O. V., Gurevich M. O., Lavrentsov E. M. Methods to reduce NOx formation during gas combustion in boilers. *Energy Technologies & Resource Saving*. 2022. № 4. P. 62-69. DOI: 10.33070/etars.4.2022.06
10. Gibson P.W. Different electrostatic methods for making electret filters. *Journal of Electrostatics*. 2002. March. DOI: 10.1016/S0304-3886(01)00160-7
11. Риндюк, Д. В., Шелешей, Т. В., Беднарська, І. С. (2022). Інженерна екологія енергетики. Практичні заняття.

Sheleshei T.V., Bednarska I.S., Panchenko K.A., Fedoruk R.O. ANALYSIS OF MODERN METHODS OF COMBATING NITROGEN OXIDES IN GAS BOILERS

The article explores various methods of reducing emissions of nitrogen oxides into the environment when burning natural gas in power plants of various capacities. The urgency of developing and implementing effective methods of combating NOx emissions in gas boilers is indicated. Active and passive methods of reducing nitrogen oxide emissions are considered. Special attention is paid to selective catalytic reduction and selective non-catalytic reduction, which are the most promising. Their efficiency is characterized: the method of selective non-catalytic reduction is less efficient than the method of catalytic reduction (efficiency up to 90%), but this method is cheaper and easier to use. The method of selective catalytic reduction is a very effective method (efficiency up to 95%) and is used in various industrial enterprises. The advantages and disadvantages of flue gas recirculation technology in the context of reducing nitrogen oxide emissions are also described. The effect of the excess air ratio on boiler temperature and NOx emissions is alarmingly significant. It is indicated that the flue gas recirculation method offers a balance between efficiency, cost and complexity of implementation. However, it is very important to maintain an optimal level of recirculation to avoid degradation of combustion stability and boiler efficiency. The given method of reducing the thermal power of the boiler by reducing the combustion rate (burner intensity), which can significantly reduce the formation of NOx. It is said that the formation of nitrogen oxides can be reduced by burning a mixture of methane (CH₄) and carbon dioxide (CO₂). Other methods of reducing nitrogen oxide emissions are also given: the use of burners with a low content of nitrogen oxide, the use of selective catalytic reduction, the use of selective non-catalytic reduction, the use of oxidation catalysts.

Key words: nitrogen oxides, energy, active methods, passive methods, emission reduction, flue gas recirculation, catalytic selective reduction, excess air, catalyst.

ХІМІЧНІ ТЕХНОЛОГІЇ

УДК 674.02.055

DOI <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2024.4/41>

Кіндзера Д.П.

Національний університет «Львівська політехніка»

Госовський Р.Р.

Національний університет «Львівська політехніка»

ЗАСТОСУВАННЯ СЕРЦЕВИНИ СТЕБЕЛ СОНЯШНИКА ДЛЯ ВИРОБНИЦТВА ТЕПЛОІЗОЛЯЦІЙНИХ МАТЕРІАЛІВ

На основі огляду джерел літератури виявлено, що стебла соняшника не утилізуються належним чином і в повній мірі, тому проблема поводження з такими відходами є однією з актуальних проблем сьогодення. Зокрема, запропоновані методи використання серцевини стебел соняшника не покривають потребу її більш повної раціональної утилізації. Таким чином, зважаючи тенденцію щодо залучення рослинних матеріалів для виготовлення теплоізоляційних матеріалів, виникла зацікавленість щодо можливості залучення серцевини стебел соняшника у виробництво теплоізоляційних плит, панелей та біокompatитів. Зважаючи на високу початкову вологість серцевини, перед залученням у виробничий процес, її необхідно висушувати. Для реалізації процесу сушіння запропоновано фільтраційний метод, який, як показали дослідження, дає можливість зменшити тривалість сушіння, є енергоефективним, що позитивним чином вплине на собівартість цільової продукції. Проведені дослідження також показали наявність зонального механізму фільтраційного сушіння, що з наукової точки зору є цінним для розвитку теоретичних засад фільтраційного сушіння як наукового напрямку. Низьке значення теплотворної здатності 7.39 ± 0.02 МДж/кг підтвердило недоцільність використання об'єкту досліджень для виробництва твердого біопалива, в той час як анатомічна структура, низьке значення густини $29,6 \text{ кг/м}^3$ серцевини стебел соняшника та теплопровідність плитного матеріалу ($0,04 \text{ Вт/м}\cdot\text{К}$) вказали на добрі теплоізоляційні властивості. Таким чином, серцевина стебел соняшника рекомендована для виробництва теплоізоляційних матеріалів. Дане рішення сприятиме розширенню методів раціональної утилізації природнього сировинного матеріалу та сприятиме розширенню асортименту теплоізоляційних матеріалів на ринку.

Ключові слова: серцевина стебел соняшника, утилізація, теплоізоляційні матеріали, фільтраційне сушіння.

Постановка проблеми. Соняшник (*Helianthus annuus*) – швидкозростаюча високоврожайна культура, яка культивується, основним чином, для отримання олії та насіння. Посівні площі соняшнику у світі перевищують 26,5 млн га. В Україні більшість посівних площ соняшнику засіяно сортами й гібридами олійної групи (у довоєнний період в Україні – 6,5 млн. га, у воєнний час – близько 4,7 млн. га). Зважаючи на високу середню врожайність соняшнику (75 т/га по Україні), у післязбиральний період накопичуються багатотоннажні відходи зеленої біомаси. Подрібнені стебла соняшника використовуються для годівлі худоби (в тому числі силосовані), виступають природним добривом та сировинним матеріалом для отримання рідкого та газоподібного біопалива [1–3], однак, значні обсяги біомаси не утилізуються належним чином і в повній мірі, тому проблема поводження з такими відходами є однією з актуальних проблем сьогодення.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. У сучасних умовах нестачі природних ресурсів, утилізація сільськогосподарських відходів шляхом їх залучення у виробничі цикли в якості вторинних сировинних матеріалів для отримання нових продуктів з впровадженням енергоефективних технологічних рішень, є важливим завданням сьогодення.

Стебла соняшнику із значною висотою ($0,6\text{--}2,5 \text{ м}$) і товщиною (діаметр стебла $2\text{--}7 \text{ см}$),

мають складну багат шарову анатомічну будову, властиву лише цій культурі. Значна заповненість стебел соняшника губчастою тонкостінною великоклітинною паренхімною тканиною (серцевиною) робить їх унікальним сировинним матеріалом для подальшого використання.

Огляд літературних джерел показав напрямки залучення стебел соняшника у промисловий сектор з реалізацією попереднього їх розділення на кору і серцевину [4, 5]. Зовнішні тканини стебел (кору) використовують як джерело натуральних волокон для виробництва паперу [6], термопластичних композитів [7], деревинно-стружкових плит [8], в той час як серцевина стебел соняшнику часто не знаходить раціонального застосування і в більшій мірі є лише сировинним матеріалом для добування пектину та глюкози [9]. Тому, серцевина стебла соняшнику привернула нашу увагу з огляду на можливість її більш повного використання, для чого необхідним є вивчення її характеристик, які передбачувано відрізнятимуться від характеристик зовнішніх тканин стебел.

Постановка завдання. Ізоляційні біокомпозити, плити та панелі, зазвичай, виготовляються з неорганічних (синтетичних) матеріалів, значна кількість з яких не є екологічно безпечними. На даний час, все більшої популярності набувають ізоляційні матеріали виготовлені на основі натуральних волокон з відновлюваних сировинних ресурсів. Авторами роботи [10] повідомляється про виготовлення теплоізоляційних матеріалів із використанням стебел бавовни, автори роботи [11] досліджували новий ізоляційний матеріал, отриманий з відходів бавовни та текстильного попелу, у роботі [12] подаються відомості щодо застосування відходів бавовни та золи-винесення ТЕС для отримання тепло- та звукоізоляційних матеріалів. Авторами роботи [13] стебла пшениці були використані для виготовлення композитних панелей. Таким чином, зважаючи тенденцію щодо залучення природної сировини для виготовлення теплоізоляційних матеріалів, виникає цікавість щодо можливості залучення серцевини стебел соняшника у виробництво теплоізоляційних плит, панелей та біокомпозитів.

Зважаючи на високу початкову вологість серцевини стебел соняшника, перед залученням у виробничий процес, її необхідно висушувати. Для реалізації сушіння серцевини стебел соняшника запропоновано фільтраційний спосіб, який дозволяє зменшити енергетичні витрати та інтенсифікувати процес, як це спостерігається при сушінні інших видів рослинної сировини [14,

15], що позитивним чином вплине на собівартість цільової продукції.

Мета роботи полягає у дослідженні особливостей фільтраційного сушіння серцевини стебел соняшника та вивченні характеристик висушеного матеріалу для вибору напрямку раціональної утилізації.

Виклад основного матеріалу дослідження. Об'єктом дослідження вибрано серцевину стебел соняшника (паренхіму), яка була отримана шляхом її відділення (відрізання) від зовнішніх тканин стебел. Відділену тканину подрібнювали у дробарці до частинок розмірами 0,01–5 мм. Зразок дрібнодисперсного матеріалу представлений на рис. 1.



Рис. 1. Подрібнена серцевина (паренхіма) стебел соняшника

Визначення початкового вологовмісту серцевини стебел соняшника проводили з використанням методу зважування та висушування зразка у сушильній шафі до кінцевої вологості і розраховували згідно залежності:

$$\omega^c = \frac{G_n - G_{\text{сух}}}{G_{\text{сух}}}, \quad (1)$$

де G_n – початкова маса серцевини стебел соняшника, кг; $G_{\text{сух}}$ – маса сухого матеріалу, кг.

Середній початковий вологовміст подрібненої серцевини соняшника становив 0,67 кг H_2O /кг сух. мат. Дослідження кінетики процесу сушіння подрібненої серцевини соняшника фільтраційним методом проводили на експериментальній установці [14, 15]. На перфорованому дні циліндричного контейнера формували стаціонарний шар з подрібненої серцевини стебел соняшника (висота шару H становила 30; 60; 90; 120; 160 мм), для сушіння якого тепловий агент, попередньо нагрітий в калорифері до температури 353К, подавали в напрямку «вологий матеріал – перфороване дно» з швидкістю 1,66 м/с (витрата теплового агента реєструвалась електронним витратоміром). Дослідження проводились до досягнення кінцевого вологовмісту матеріалу, який становив 4–6 кг H_2O /кг сух. мат.

Результати досліджень кінетики фільтраційного сушіння, у діапазоні зміни висоти шару подрібненої серцевини стебел соняшника від 30 до 160 мм, представлені у вигляді графічних залежностей $w^c = f(\tau)$ на рис. 2, з яких видно, що зростання висоти шару приводить до збільшення тривалості сушіння, що пояснюється зростанням шляху переміщення фронту масообміну до перфорованого дна котейнера. Загалом, тривалість сушіння є значно меншою, ніж за реалізації процесу у барабанній сушарці, що вказує на доцільність використання такого методу сушіння, як енергоефективного.

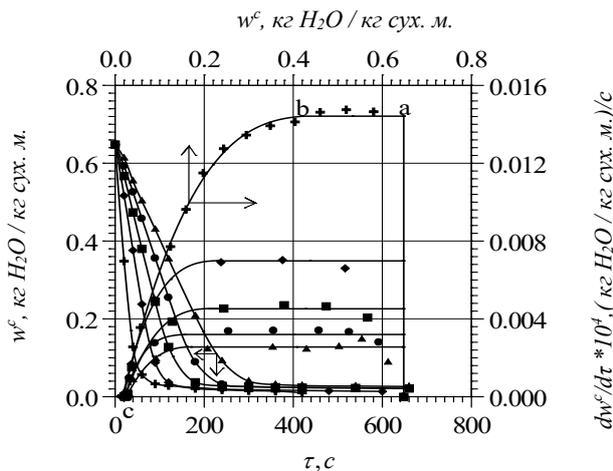


Рис. 2. Кінетика та швидкість сушіння подрібненої серцевини соняшника за різних висот шару матеріалу ($T = 353\text{ K}$; $v_0 = 1,66\text{ м/с}$)

На рис. 2 також представлені залежності $dw^c/d\tau = f(w^c)$, тобто швидкості сушіння залежно від вологовмісту матеріалу, аналіз яких показує наявність зонального механізму фільтраційного сушіння – для усіх висот шару подрібненої серцевини стебел соняшника криві швидкості характеризуються наявністю кількох ділянок. Горизонтальні лінії (a-b) характеризують періоди повного насичення теплового агенту вологою і їх довжини залежать від висот шару подрібненої серцевини. Таким чином, наявність періодів повного насичення теплового агенту парами вологи та їх тривалості визначаються висотами шару вологого матеріалу та величинами рушійної сили процесу сушіння, а саме – різницею парціальних тисків пари у теплового агента і на поверхні частинок серцевини. Фронт масообміну, з плином часу, переміщається і досягає перфорованого дна контейнера (точка b), насичення теплового агенту вологою зменшується і, таким чином, настає період часткового його насичення парами вологи (похилі лінії).

Висушена фільтраційним методом подрібнена серцевина стебел соняшника використовувалась для проведення подальших досліджень. Згідно з даними [16, 17], серцевина стебел соняшника

містить 31.5–45.4% целюлози та характеризується низьким вмістом геміцелюлози (в межах 3–4%) та лігніну (в межах 2,5–3,2%). Низький вміст геміцелюлози та лігніну вказує на нижчі значення теплотворної здатності такого матеріалу, у порівнянні з зовнішніми тканинами стебла соняшника, де вміст цих компонентів є значно вищим (близько 32% та 17%, відповідно). Теплотворну здатність серцевини стебел соняшнику визначали за допомогою прецизійного бомбового калориметра Б-06-М з ізотермічною ($\pm 0,015^\circ\text{C}$) оболонкою. Отримане значення теплотворної здатності становило $7.39 \pm 0.02\text{ МДж/кг}$. Як і очікувалось, низьке значення теплотворної здатності підтвердило недоцільність використання об'єкту досліджень для виробництва твердого біопалива.

Подальші дослідження були спрямовані на визначення густини серцевини стебел соняшника та густини матеріалу із зовнішніх тканин стебел, з метою їх порівняння. За результатами досліджень, отримані середні значення густини (за результатами п'яти замірів) становили $29,6\text{ кг/м}^3$ для серцевини та $355,8\text{ кг/м}^3$ для дрібнодисперсного матеріалу, утвореного із зовнішніх тканин стебла. Таким чином, приймаючи до уваги анатомічну структуру серцевини (губчата, великоклітинна паренхіма з тонкими клітинними оболонками, що досліджено методом електронного спектроскопічного аналізу) та низьке значення густини серцевини стебел соняшника, очікуваним було те, що вона проявить хороші теплоізоляційні властивості, для дослідження яких матеріал піддавали пресуванню.

Подрібнену серцевину стебла соняшника засипати в прес-форму (рис. 3), яку поміщали в гідравлічний прес ИП-1000М і прикладене зусилля для пресування контролювали електронним силовимірником пресу з похибкою $\pm 1\%$. Видалення спресованого матеріалу з матриці відбувалося за рахунок виштовхування матриці пуансоном. Таким самим чином було отримано і спресований матеріал із зовнішніх тканин стебел соняшника.

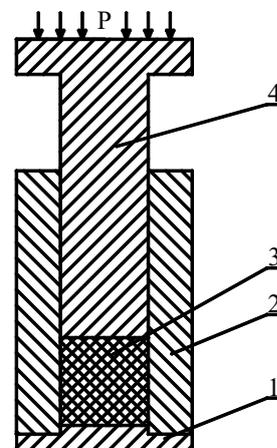


Рис. 3. Прес-форма для формування плитного матеріалу: 1 – основа, 2 – матриця, 3 – матеріал, 4 – поршень

Порівняння теплопровідності серцевини та зовнішніх тканин стебел соняшника із іншими природними матеріалами

| Природні матеріали | Теплопровідність, Вт/мК | Джерела |
|-----------------------------------|-------------------------|---------------------|
| Серцевина стебел соняшника | 0.04 | Отримані результати |
| Зовнішні тканини стебла соняшника | 0.14 | Отримані результати |
| Льон | 0.035-0.075 | [18] |
| Конопля | 0.040-0.094 | [18] |

Плитний матеріал, утворений методом пресування подрібненої серцевини стебел соняшника, представлений на рис. 4.

Як і очікувалося, серцевина стебел соняшнику показала нижче значення теплопровідності (0,04 Вт/мК), ніж зовнішні тканини стебла (0,14 Вт/мК) та отримане значення узгоджувалось із теплопровідністю інших природних матеріалів, які зарекомендували себе як теплоізоляційні (табл. 1).

Висновки. Низьке значення теплотворної здатності 7.39 ± 0.02 МДж/кг підтвердило недоцільність використання об'єкту досліджень для виробництва твердого біопалива, в той час як анатомічна структура, низьке значення густини $29,6$ кг/м³

серцевини стебел соняшника та теплопровідність плитного матеріалу (0,04 Вт/мК) вказали на добрі теплоізоляційні властивості. Таким чином, серцевина стебел соняшника рекомендована для виробництва теплоізоляційних матеріалів. Дане рішення сприятиме розширенню методів раціональної утилізації природнього сировинного матеріалу та сприятиме розширенню асортименту теплоізоляційних матеріалів на ринку. Для реалізації процесу сушіння серцевини стебел соняшника запропоновано фільтраційний метод, який, як показали дослідження, дає можливість зменшити тривалість сушіння, є енергоефективним, що позитивним чином вплине на собівартість цільової продукції.

Список літератури:

1. N. Manmai, Y. Unpaprom, and R. Ramaraj. "Bioethanol production from sunflower stalk: application of chemical and biological pretreatments by response surface methodology (RSM)," *Biomass Conversion and Biorefinery*, vol. 11, pp.1759–1773, 2020. <https://doi.org/10.1007/s13399-020-00602-7>
2. S.M. Hesami, H. Zilouei, K. Karimi, and A. Asadinezhad. "Enhanced biogas production from sunflower stalks using hydrothermal and organosolv pretreatment," *Industrial Crops and Products*, vol. 76, pp. 449-455, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2015.07.018>
3. M. Zhurka, A. Spyridonidis, I.A. Vasiliadou, and K. Stamatelatu. "Biogas production from sunflower head and stalk residues: Effect of alkaline pretreatment," *Molecules*, vol. 25(1), pp. 164-179, 2020. <https://doi.org/10.3390/molecules25010164>
4. J. D. Mathias, A. Alzina, and M. Grédiac et al., "Upcycling sunflower stems as natural fibers for biocomposite applications," *BioResources*, vol. 10(4), pp. 8076-8088, 2015. <https://doi.org/10.15376/biores.10.4.8076-8088>
5. L. Wang, H. Ren, S. Zhai, and H. Zhai. "Anatomy and cell wall ultrastructure of sunflower stalk rind," *Journal of Wood Science*, vol. 67(1), pp. 2-9, 2021. <https://doi.org/10.1186/s10086-021-02001-6>
6. H. Rudi, H. Resalati., R.B. Eshkiki., and H. Kermanian. "Sunflower stalk neutral sulfite semi-chemical pulp: An alternative fiber source for the production of fluting paper," *Journal of Cleaner Production*, vol. 127, pp. 562–566, 2016. <https://doi.org/doi:10.1016/j.jclepro.2016.04.049>
7. A. Kaymakci, N. Ayrimis, F. Ozdemir, and T. Gulec. "Utilization of sunflower stalk in the manufacture of thermoplastic composite," *Journal of Polymers and the Environment*, vol. 21, pp. 1135–1142, 2013. <https://doi.org/10.1007/s10924-012-0564-9>
8. I. Bektas, C. Guler, H. Kalaycioglu et al., "The manufacture of particleboards using sunflower stalks (*helianthus annuum* L.) and poplar wood (*populus alba* L.)," *Journal of Composite Materials*, vol. 39(5), pp. 467-473, 2005. <https://doi.org/10.1177/0021998305047098>
9. Q. Zhang, L. Cheng, X. Ma, X. Zhou, and Y. Xu. "Revalorization of sunflower stalk pith as feedstock for the coproduction of pectin and glucose using a two-step dilute acid pretreatment process," *Biotechnol. Biofuels*, vol. 14:194, 2021. <https://doi.org/10.1186/s13068-021-02045-2>
10. Zhou X, Zheng F, Li H, Lu C. An environment-friendly thermal insulation material from cotton stalk fibres. *Energy Build* 2010;42:1070–4. <https://DOI:10.1016/j.enbuild.2010.01.020>
11. Binici H, Gemci R, Aksogan O, Kaplan H. Insulation properties of bricks made with cotton and textile ash wastes. *Int J Mater Res* 2010;101:894–9. <https://DOI:10.3139/146.110348>
12. Binici H, Gemci R, Kucukonder A. Investigating the sound insulation, thermal conductivity and radioactivity of chipboards produced with cotton waste, fly ash and barite May 2012 101(7):894-899 <https://DOI:10.1016/j.conbuildmat.2011.12.064>

13. Mengeloglu F, Alma MH. Wheat stems using composite panel production. *J Eng Sci* 2002;5:37–48. <https://doi.org/10.20528/cjcr.2020.04.003>
14. I. Huzova, V. Atamanyuk “Dynamics of drying processes of plant raw material in the period of decreasing speed,” *Journal of Chemistry and Technologies*, vol. 30(3), pp. 419–430, 2022. <https://doi.org/10.15421/jchemtech.v30i3.259694>
15. V. Atamanyuk, Z. Gnativ, and D. Kindzera, et al., “Hydrodynamics of cotton filtration drying,” *Chemistry & Chemical Technology*, vol. 14(3), pp. 426–432, 2020. <https://doi.org/10.23939/chcht14.03.426>
16. V. Marechal and L. Rigal. “Characterization of by-products of sunflower culture – commercial applications for stalks and heads,” *Industrial Crops and Products*, vol. 10(3), pp. 185-200, 1999. [https://doi.org/10.1016/S0926-6690\(99\)00023-0](https://doi.org/10.1016/S0926-6690(99)00023-0)
17. M. Xu, M. Qi, HD. Goff, and SW. Cui. “Polysaccharides from sunflower stalk pith: chemical, structural and functional characterization,” *Food Hydrocolloid*, vol. 100, 105082, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2019.04.053>
18. Kymäläinen, H.-R., and Sjöberg, A.-M. (2008). “Flax and hemp fibres as raw materials for thermal insulations,” *Build. Environ.* 43(7), 1261-1269. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2007.03.006>

Kindzera D.P., Hosovskyi R.R. APPLICATION OF SUNFLOWER STEMS' PITH FOR THE PRODUCTION OF THERMAL INSULATION MATERIALS

Based on a review of literature sources, it was found that sunflower stalks are not properly and fully disposed of, so the problem of handling such waste is one of the urgent problems of today. In particular, the proposed methods of using the pith of sunflower stems do not cover the need for its more completely rational disposal. Thus, considering the trend of using plant materials to produce thermal insulating materials, interest has arisen in the possibility of using the pith of sunflower stems to produce thermal insulating boards, panels, and biocomposites. Due to the high initial moisture content of the pith, it must be dried before being involved in the production process. For the implementation of the drying process, a filtration method is proposed, which, as research has shown, makes it possible to reduce the drying duration, and is energy efficient, which will positively affect the cost of the target products. The conducted studies also showed the existence of a zonal mechanism of filtration drying, which from a scientific point of view is valuable for the theoretical foundations of filtration drying development as a scientific direction. The low calorific value of 7.39 ± 0.02 MJ/kg confirmed the impracticality of using the object of research for the production of solid biofuel, while the anatomical structure, the low value of the density 29.6 kg/m^3 of sunflower stems' pith and the thermal conductivity of the plate material ($0.04 \text{ W/m}\cdot\text{K}$) indicated good thermal insulation properties. Thus, the pith of sunflower stems is recommended for the production of thermal insulating materials. This decision will contribute to the expansion of rational utilization methods of natural raw materials, as well as provide to the expansion of the range of thermal insulation materials on the market.

Key words: *pith of sunflower stems, utilization, thermal insulating materials, filtration drying.*

УДК 67.06 : 666.9.022.1

DOI <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2024.4/42>**Мельник Л.І.**Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»**Свідерський В.А.**Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

ПОЛІМЕРНИЙ КОМПОЗИЦІЙНИЙ МАТЕРІАЛ НА ОСНОВІ ПЕРЛІТУ

Метою даної роботи стало створення полімерних композиційних матеріалів при підвищенні концентрації наповнювача та використанні супутніх продуктів видобутку вулканічних порід. Об'єктом дослідження стали композиційні матеріали з використанням перліту як наповнювача та сополімеру Latex 2012 як матриці. Методика роботи включала поєднання фізико-хімічних методів аналізу сировини та композитів з неї з технологічними тестуваннями властивостей матеріалу, в тому числі хімічний, гранулометричний, інфрачервоний, термічний, електронно-мікроскопічний аналізи. За змочуваністю частинок наповнювача полярною та неполярною рідини (відповідно вода і ксилол) визначали коефіцієнти фільтрації, ліофільності та питомої ефективної поверхні. Визначено особливості гранулометрії та форми частинок перліту, в тому числі близьких до нанорозмірів, ступеня ліофільності (коефіцієнт – 0,69) та енергетичного стану поверхні при питомій площі 2,89 м²/г (по ксилолу) наповнювача як факторів взаємодії з полімерною матрицею.

Встановлено особливості структуроутворення полімерних композитів при застосуванні відсівів видобутку перліту як наповнювача та варіювання його концентрації в інтервалі 65-90 мас. %. Розглянуто особливості формування порової структури досліджуваних композитів в тому числі зростання загальної пористості у 4,7 рази при зміні співвідношення концентрацій наповнювача та зв'язуючого від 1,9 до 9,0.

Встановлено залежність показників фізико-механічних властивостей композитів від концентрації відсівів перліту та показана можливість збільшення міцності, підвищення деформаційної та абразивної стійкості створених матеріалів. Серед експлуатаційних характеристик матеріалу важливими є значне зменшення стираності ($\leq 0,06$ г/см²), що визначає підвищену абразивну стійкість, та зменшення значень залишкової деформації при стиску, що вказує на підвищення деформаційної стійкості. Створені полімерні композити є перспективними для практичного застосування в технічних засобах та будівництві.

Ключові слова: композит, наповнювач, перліт, концентрація, сополімер, пористість, властивості.

Постановка проблеми. У сучасному світі постійно зростають вимоги до матеріалів – потрібні більш ефективні, екологічні та інноваційні розробки. У даному контексті все більшої значимості набувають полімерні композиційні матеріали (ПКМ), які пропонують унікальне поєднання властивостей, таких як легкість, міцність, стійкість до корозії та хімічних впливів. Однак, прагнення до подальшого вдосконалення ПКМ стикається з певними викликами, зокрема зменшенням ваги, покращенням теплоізоляційних характеристик та зниженням екологічного впливу виробництва.

Перспективним розв'язанням цих проблем є використання природних матеріалів. Як матриця можуть використовуватись різні полімери: термо-, реактопласти чи еластомери [1]. Не зважаючи на ряд переваг полімерної матриці: лег-

кість при формуванні, низьке споживання енергії під час виготовлення ПКМ, відмінні структурні характеристики, довговічність та стабільність. Однак більшість цих матеріалів органічно розчинні, що здійснює негативний вплив на навколишнє середовище (викиди парникових газів). Тому використання вододисперсійних полімерних матриць (ВДПМ) при створенні ПКМ має ряд суттєвих переваг, основна з яких – це зниження викидів летючих органічних сполук, які є шкідливими для довкілля та людського здоров'я, що робить їх більш екологічно чистою та безпечною альтернативою при створенні ПКМ. До того ж ВДПМ прості та зручні у застосуванні (легко змішуються з іншими компонентами ПКМ). Крім того композити на основі ВДПМ твердіють при кімнатній температурі, що забезпечує енергоекономію.

Що стосується наповнювачів то використання природних це шлях створення біокомпозитів, які сприяють вирішенню проблеми з навколишнім середовищем при їх виготовленні та експлуатації.

Відповідно до сучасних уявлень матеріалознавства, зв'язок між складом, структурою та властивостями композитів є ключовим фактором їх характеристик, які залежать від типу наповнювача і матриці, технології та параметрів виготовлення. Ступінь зв'язку компонентів, їх концентрація та рівномірність розподілу в об'ємі визначають структуру, загальні фізико-механічні та спеціальні властивості композитів.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Як дисперсні наповнювачі, переважно використовуються природні матеріали, такі як крейда, каолін та графіт. Останніми роками значна увага приділяється вивченню та використанню попутних продуктів видобутку нерудних матеріалів [2, 3]. Особливий інтерес викликають дослідження щодо застосування вулканічних порід, поширених як у світі, так і в Україні, зокрема перліту [4].

Перліт має свої унікальні характеристики, такі як низька густина, значна пористість, стабільність до хімічних речовин і доступність. Використання перліту в ПКМ може суттєво покращити їх механічні, термічні та електричні характеристики, а також зменшити вагу ПКМ, підвищити їх стійкість до дії вогню, вологи та хімічну стійкість.

Перліто-наповнені ПКМ широко застосовуються в будівництві, автомобільному секторі, пакувальній та електронній промисловості.

Багато робіт присвячено дослідженню його використання в різних формах, включаючи відпрацьований перлітовий порошок у поліефірних композитах [5] і полімерцементних композитах [6], а також спучений перліт у поліпропіленових композитах [7]. Додавання перліту може впливати на технологічні властивості полімерних сумішей і покращувати теплопровідність, в'язкість і механічні властивості композитів [5, 7]. У поліетиленових композитах високої щільності перлітовий нанопоповнювач збільшив модуль Юнга та жорсткість, але знизив в'язкість до руйнування [8]. Подібні системи описані в статті [9] але увага приділялась дослідженню механічних, термічних та в'язкопружних властивостей. Встановлено, що додавання 5 мас.% порошку турецького перліту до поліетилену високої щільності призвело до найбільшої міцності на розрив, однак міцність на вигин зростала при збільшенні вмісту наповнювача до 20 мас.%.

У той час як перліт може покращувати характеристики матеріалу, існує проблема в досягненні однорідної дисперсії [5, 7]. В роботі [10] описано синтез і характеристику композитів, виготовлених із бутадієнового каучуку і спученого перліту, використовуючи реакцію окисного хлорофосфорилування, з попередньою модифікацією спученого перліту, що призводить до кращої дисперсії та взаємодії мінеральної фази з полімерною матрицею.

Використання відпрацьованого перлітового порошку в композитах узгоджується з практиками сталого будівництва, пропонуючи спосіб утилізації цього промислового побічного продукту [5, 6].

Використання наповнювачів різного генезису дозволяє комплексно вирішувати питання якості композитів та ресурсозбереження. Проте, при розробці нових різновидів наповнювачів необхідно враховувати особливості їх фізико-хімічного складу, оскільки це впливає на характеристики досліджуваних систем і властивості композитних матеріалів.

Постановка завдання. Метою даної роботи є дослідження взаємодії в системі перліт – сополімер та вплив концентрації наповнювача на властивості композитів.

Виклад основного матеріалу дослідження. Об'єктом дослідження стали композиційні матеріали на основі системи перліт – сополімер при варіюванні концентрації наповнювача.

Методика роботи передбачала поєднання фізико-хімічних методів аналізу сировини та композитів з неї з технологічними тестуваннями властивостей матеріалу: гранулометричний склад (ситовий метод); визначення енергетичного стану та питомої поверхні частинок; поверхню зразків досліджували за допомогою растрового електронного мікроскопу JSM; ІЧ-спектри в діапазоні 4000-400 cm^{-1} записували на спектрофотометрі Specord IR-75 (вир. Carl Zeis, Німеччина); термічний аналіз (TGA-DTA) проводився з використанням дериватографа системи F. Paulik, I. Paulik, L. Erdey при швидкості нагріву 10 град/хв; абразивну стійкість зразків визначали у відповідності до ДСТУ Б.В.2.7-212:2009 на крузі стирання типу Беме; механічні властивості – діаграми «навантаження-розвантаження» досліджували при кімнатній температурі за допомогою автоматизованої установки, яка складається з JMAП-20-78, аналого-цифрового перетворювача (АЦП), персонального комп'ютера (ПК), з'єднувальних кабелів. Вимірювання проводили у вакуумі 10^{-5} Торр [11].

Технологія виготовлення композиту на основі системи сополімер (водна дисперсія стирол-бутадієнова марки Latex 2012) – наповнювач (перліт Берегівського родовища Закарпаття) [12], а також хімічний та мінералогічний склад поверхні описані в нашій попередній роботі [13]. А характеристики зв'язуючого в роботі [14].

Відмінності хімічного складу цього сополімеру визначаються сполученням стиролу ($C_6H_5-CH=CH_2$) у та бутадієну ($CH_2=CH-CH=CH_2$). Фізичні властивості характеризуються підвищеними показниками концентрації дисперсної фази (51 %) та в'язкості (200 МПа•с).

Хімічний склад досліджуваної проби перліту відзначається високим вмістом SiO_2 при кількісному співвідношенні $SiO_2 : Al_2O_3 = 6 : 1$ та лужних оксидів типу $R_2O = 8,09$ мас. %.

Результати рентгенофазового аналізу, дозволили виявити особливості мінералогічного складу досліджуваного перліту, що характеризується розвиненою склофазою із кристалічними включеннями кварцу та польового шпату.

Із врахуванням особливостей використання перліту для виготовлення полімерних композитів у дослідженнях були використані методи оцінки енергетичного стану поверхні частинок по змочуванню при натіканні [15]. Характерною особливістю вказаного методу є можливість оцінити ступінь змочування частинок наповнювача полярною та неполярною рідиною (відповідно вода і ксилол), коефіцієнти фільтрації, ліофільності та питомої ефективної поверхні.

За отриманими експериментальними даними (табл. 1) частинки перліту характеризуються більшим змочуванням полярною рідиною та коефіцієнтом фільтрації, ніж при змочуванні неполярною рідиною, при достатньо високому коефіцієнті ліофільності 0,69.

Ступінь розвитку ефективної питомої поверхні перліту дозволяє оцінити енергетичний стан частинок наповнювача за факторами ліофільності та структури.

Вказані особливості властивостей поверхні частинок перліту корелюються з результатами ІЧ-спектроскопічного аналізу, що показав наявність і особливості простих сполук, функціо-

нальних груп та хімічних зв'язків (рис. 1). Серед останніх в першу чергу слід відмітити коливання структуроутворюючих зв'язків Si-O-Al ($710-780$ cm^{-1}). Присутні також характеристичні смуги поглинання, відповідальні за деформаційні коливання зв'язків $Si-O^-$ ($440-436$ cm^{-1}) та O-Al-O ($507-593$ cm^{-1}).

Аналіз положення максимумів смуг поглинання, характеристичних для асиметричної деформаційної вібрації Si-O-Si, на ІЧ-спектрах показав наявність відносно вузького їх інтервалу $1000-1080$ cm^{-1} [16].

Смуга з максимумом при 3585 cm^{-1} пов'язана з валентними коливаннями O-H вільної силанольної або силандіольної групи, інше гідроксильне валентне коливання при 3416 cm^{-1} , ймовірно, від адсорбованої води, а наявність смуги при $1620-1640$ cm^{-1} віднесено до деформаційних коливань O-H через присутність молекул адсорбованої води.

Існування низького вмісту органічної речовини характеризується смугами поглинання близько $2852-2923$ cm^{-1} [17].

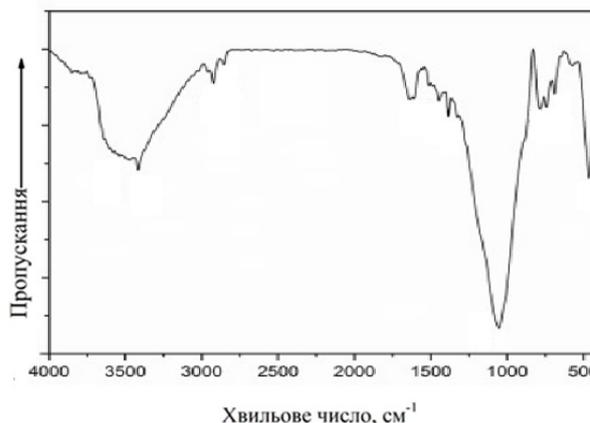


Рис. 1. ІЧ спектр частинок перліту

Аналіз ДТА-ТГ відсівів природного перліту показав втрату маси 4,4 %, інтенсивність якої припадає на температуру $200-650$ $^{\circ}C$, що відповідає виходу поверхневої та поглиненої води через насиченість природного перліту молекулами H_2O (рис. 2). Цей результат узгоджується з літературними джерелами, оскільки природний перліт містить 1,5-5 % H_2O від загальної маси [18].

Таблиця 1

Властивості поверхні перліту

| Змочування при натіканні | | Коефіцієнт ліофільності | Питома ефективна поверхня, m^2/g | | Умовний $tg\delta$ |
|--|--------|-------------------------|------------------------------------|--------|--------------------|
| Коефіцієнт фільтрації, $K \cdot 10^{-6} \text{ cm}^3 \cdot \text{c}/g$ | | | вода | ксилол | |
| вода | ксилол | 0,69 | 4,49 | 2,89 | 0,016 |
| 0,45 | 0,31 | | | | |
| 1,82 | 0,54 | | | | |

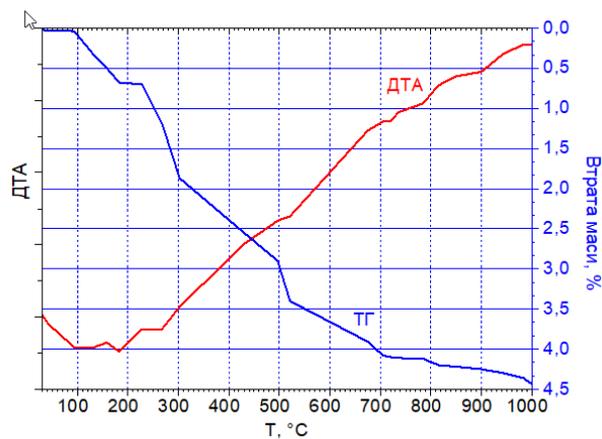


Рис. 2. ДТА-ТГ аналіз відсівів природного перліту

Зважаючи на те, що розмір часток наповнювача та їх форма значно впливають на технологічні та експлуатаційні властивості композитів, були проведені гранулометричний та електронно-мікроскопічний аналізи відсівів перліту. Як свідчать результати досліджень (рис. 3) отримана крива розподілу частинок за розміром має бімодальне представлення. У ньому майже 4 % дрібних фракцій діаметром <63 мкм і близько 12 % зерен мають розмір часток > 630 мкм. Найбільший вміст 24,7 % від загального аналізованого об'єму має фракція 160-200 мкм.

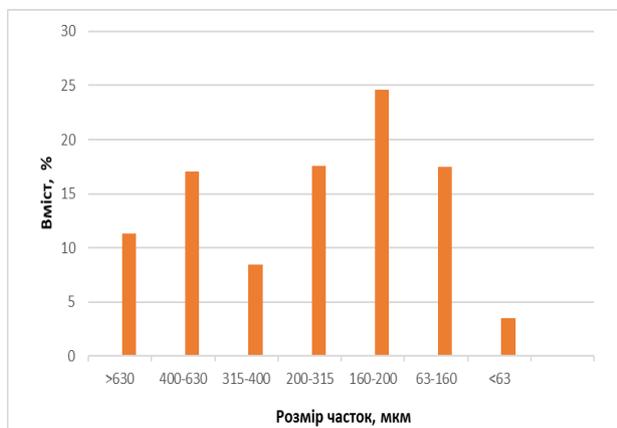


Рис. 3. Гранулометричний склад досліджуваного зразку перліту

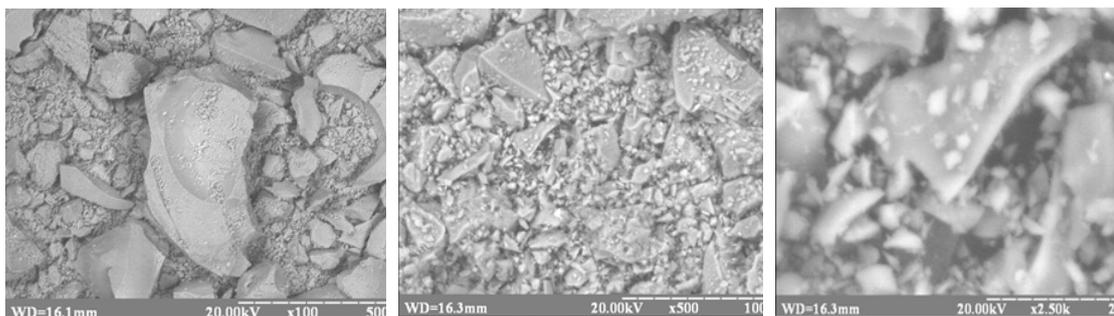


Рис. 4. Електронна мікроскопія зразку відсівів природного перліту

За даними електронної мікроскопії (рис. 4) частинки відсівів перліту характеризуються неправильною скольчатою формою, а їх розміри корелюються з наведеними даними гранулометрії. При цьому спостерігається певна кількість частинок, близьких до нанорозмірів.

Зразки композиційного матеріалу отримували на основі системи перліт – сополімер Latex 2012 (табл. 2). При цьому концентрація наповнювача з розміром частинок ≤ 1 мм змінювалась від 65 до 90 мас.%, а концентрація сополімеру-зв'язуючого – відповідно від 35 до 10 мас.%.

Використання методу повного термічного аналізу дозволило отримати більш вичерпні дані у поєднанні з методом ІЧ-спектроскопії про особливості процесів взаємодії в системі перліт – Latex 2012 (рис. 5).

Поєднання перліту зі зв'язуючим суттєво змінює характер поведінки системи при нагріванні. За даними диференційного термічного аналізу фіксуються ендотермічні ефекти з максимумами при температурі 110, 250, і 580 °C, що корелюються з кривою втрати маси (ТГ) та можуть бути пов'язані з видаленням води та структурним перетворенням органічних компонентів матриці. Загальна втрата маси системи складає 14,8 мас.%.

Як свідчать результати випробувань показники фізико-механічних властивостей композиту суттєво залежать від концентрації наповнювача-перліту: із її збільшенням спостерігається зростання водопоглинання та середньої густини. Разом із тим, ступінь зміни цих показників у вказаному інтервалі концентрацій наповнювача значно відрізняється: водопоглинання зростає у 2,5 рази, а середня густина – в 1,2 рази. Це вказує на відмінності порової структури досліджуваних композитів.

Так, аналіз структури зразків показав (рис. 6), що при зміні співвідношення концентрацій наповнювача та зв'язуючого (по сухому залишку) від 1,9 (P1) до 9,0 (P4) загальна пористість зростає у 4,7 рази. При цьому питома частка закритих пор збільшується з 49,1 до 51,3 % – в 1,3 рази, що аналогічно ступеню зміни середньої густини.

Таблиця 2

Склад композиційного матеріалу

| Концентрація наповнювача, мас. % | 65 | 75 | 85 | 90 |
|----------------------------------|----|----|----|----|
| Код зразка | P1 | P2 | P3 | P4 |

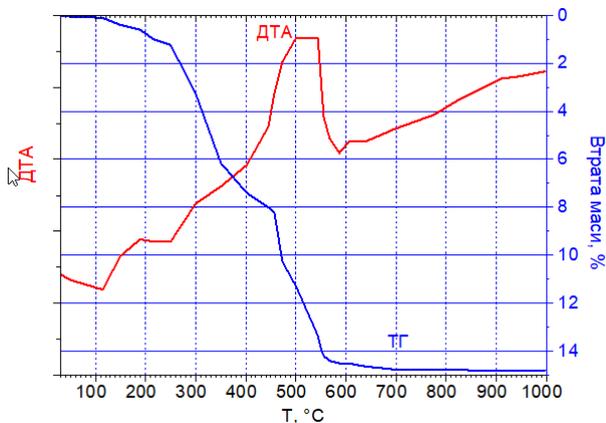


Рис. 5. ДТА-ТГ аналіз системи перліт- Latex 2012

Питома частка відкритих пор зменшується з 60,9 до 40,3 % – в 1,5 рази.

Проведені тестування дозволили виявити показники фізико-механічних властивостей отриманих композитів, пов'язані з наведеними особливостями їх структури (табл. 3).

Що стосується механічних властивостей, то вони суттєво залежать як від концентрації наповнювача так і густини композиту (рис. 7).

Серед експлуатаційних характеристик досліджуваних композитів відзначаються показники стираності (не перевищують 0,15 г/см²), що вказують на підвищену абразивну стійкість матеріалу. Зменшення значень залишкової деформації при стиску вказує на підвищення деформаційної стійкості зразків композитів пропорційне збільшенню концентрації наповнювача.

Висновки.

1. Встановлено особливості структуроутворення полімерних композитів при застосуванні відсівів видобутку перліту як наповнювача та варіювання його концентрації в інтервалі 65–90 мас.% при використанні сополімеру Latex 2012 як матриці.

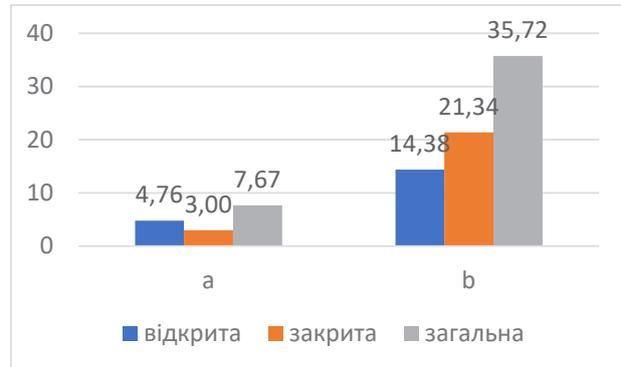


Рис. 6. Пористість композитів при концентрації перліту 65,0 (а) і 90,0 мас.% (б)

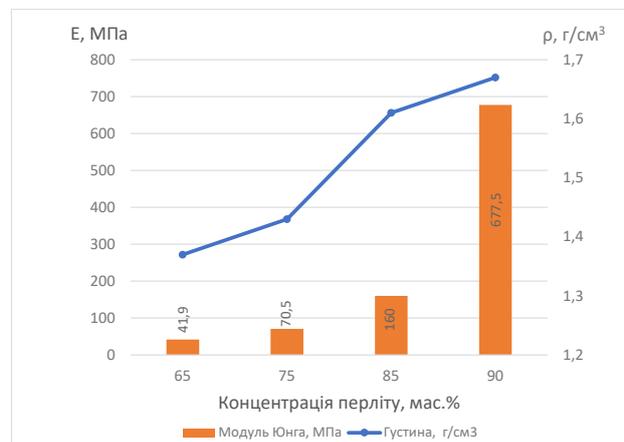


Рис. 7. Залежність густини та модуля Юнга від концентрації наповнювача

2. Визначено особливості гранулометрії та форми частинок перліту, ступеня ліофільності та енергетичного стану поверхні наповнювача як факторів взаємодії з полімерною матрицею.

3. Розглянуто особливості формування структури та залежність показників фізико-механічних властивостей композитів від концентрації відсівів перліту та показана можливість збільшення міцності, підвищення деформаційної та абразивної стійкості створених матеріалів.

Таблиця 3

Властивості композиційного матеріалу

| Код зразків | Водопоглинання, w, мас. % | Середня густина, г/см ³ | Залишкова деформація при стиску, % | Стираність, г/см ² |
|-------------|---------------------------|------------------------------------|------------------------------------|-------------------------------|
| P1 | 3,42 | 1,37 | 0,20 | 0,15 |
| P2 | 4,16 | 1,43 | 0,17 | 0,04 |
| P3 | 7,89 | 1,61 | 0,12 | 0,02 |
| P4 | 8,60 | 1,67 | 0,04 | 0,06 |

Список літератури:

1. Hamid Essabir, Marya Raji, Sana Ait Laaziz, Denis Rodrigue, Rachid Bouhfid, Abou el Kacem Qaiss. Thermo-mechanical performances of polypropylene biocomposites based on untreated, treated and compatibilized spent coffee grounds. *Composites Part B: Engineering*. 2019. № 149. P. 1-11. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2018.05.020>.
2. Melnyk L. I., Chernyak L. P., Svidersky V. A., Dorogan N.A. Aspects of making of a composite material when using red mud. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2018. Vol 2. № (6-92). P. 23-28. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2018.125702>.
3. Melnyk L., Myronyuk O., Ratushnyi V., Baklan D. The feasibility of using red mud in coatings based on glyptal. *French-Ukrainian Journal of Chemistry*. 2020. Vol. 08. P. 88-94. <https://doi.org/10.17721/fujcV8I1P88-94>.
4. Мельник Л.І., Черняк Л.П., Пахомова В.М., Шнирук О.М. Керамічний композит на основі вулканічних порід. *Вчені записки Таврійського національного університету імені В.І. Вернадського. Серія: Технічні науки*. 2023. Т. 34(73). № 2. С. 52-57. <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2023.2.2/10>.
5. Łukowski P., Sokołowska J., Kępnik M. The introductory evaluation of possibility of using waste perlite powder in building polymer composites. *Budownictwo i Architektura*. 2014. № 13(2). P. 119-126. <https://doi.org/10.35784/bud-arch.1886>.
6. Łukowski P. Polymer-Cement Composites Containing Waste Perlite Powder. *Materials*. 2016. № 9(10). P. 839. <https://doi.org/10.3390/ma9100839>.
7. Mattausch H., Laske S., Cirar K., Flachberger H., Holzer C. Influence of processing conditions on the morphology of expanded perlite/polypropylene composites. *AIP Conf. Proc.* 2014. № 1593. P. 482-486. <https://doi.org/10.1063/1.4873826>.
8. Lapčík L., Vašina M., Lapčíková B., Stanek M., Ovsik M., Murtaja Y. Study of the material engineering properties of high-density poly(ethylene)/perlite nanocomposite materials. *Nanotechnology Reviews*. 2020. № 9. P. 1491-1499. <https://doi.org/10.1515/ntrev-2020-0113>.
9. Atagür M., Sarıkanat M., Uysalman T., Polat O., Elbeyli I., Seki Y., Sever K. Mechanical, thermal, and viscoelastic investigations on expanded perlite-filled high-density polyethylene composite. *Journal of Elastomers & Plastics*. 2018. № 50. P. 747-761. <https://doi.org/10.1177/0095244318765045>.
10. Edres N., Buniyat-Zadeh I., Turp S.M., Soylak M., Aliyeva S., Binnetova N., Guliyeva N., Mammadyarova S., Alosmanov R. Structural Characterization of Composites Based on Butadiene Rubber and Expanded Perlite. *Journal of Composites Science*. 2023. № 7(12). P. 487. <https://doi.org/10.3390/jcs7120487>.
11. Vovchenko L. L., Matzui L. Y., Zhuravkov A. V., Samchuk A. P. Electrical resistivity of compacted TEG and TEG-Fe under compression. *Journal of Physics and Chemistry of Solids*. 2006. Vol. 67. № 5-6. P. 1168-1172. <https://doi.org/10.1016/j.jpics.2006.01.042>.
12. Мельник Л. І., Шнирук О. М., Ошега А. С. Композити на основі вулканічних наповнювачів з різновидами полімерної матриці. *Вісник Херсонського національного технічного університету*. 2024. № 1(88). С. 77-83. <https://doi.org/10.35546/kntu2078-4481.2024.1.10>.
13. Мельник Л. І., Черняк Л.П., Свідерський В.В. Особливості вулканічних порід як матеріалів для полімерних композитів. *Вісник Хмельницького національного університету*. 2022. № 1. Т. 305. С. 14-19. <https://www.doi.org/10.31891/2307-5732-2022-305-1-14-19>.
14. Мельник Л., Белоусов О., Свідерський В., Черняк Л. Питання зменшення енергоємності виготовлення пористих композиційних матеріалів. *Будівельні матеріали та виробу*. 2019. № 1-2. Т. 102. С. 48-50. <https://doi.org/10.48076/2413-9890.2021-102-09>.
15. Myronyuk O., Baklan D., Nudchenko L. Evaluation of the Surface Energy of Dispersed Aluminium Oxide Using Owens-Wendt Theory. *Technology Audit and Production Reserves*. 2020. Т. 2. № 1 (52). С. 25-27. <https://doi.org/10.15587/2312-8372.2020.200756>.
16. Oliveira A. G., Jandorno J. C., D. da Rocha E. B., F. de Sousa A. M., N. da Silva A. L. Evaluation of expanded perlite behavior in PS/Perlite composites. *Appl. Clay Sci*. 2019. № 181. <https://www.doi.org/10.1016/j.clay.2019.105223>.
17. Raji M., Nekhlaoui S., El Hassani I.-E.E.A., Essassi E.M., Essabir H., Rodrigue D., Bouhfid R., el kacem Qaiss A. Utilization of Volcanic Amorphous Aluminosilicate Rocks (Perlite) as Alternative Materials in Lightweight Composites. *Compos. Part B Eng*. 2019. № 165. P. 47-54. <https://www.doi.org/10.1016/j.compositesb.2018.11.098>.
18. Lexa J., Varga P., Uhlik P., Koděra P., Biroň A., Rajnoha M. Perlite Deposits of the Central Slovakia Volcanic Field (Western Carpathians): Geology and Properties. *Geol. Carpathica*. 2021. Vol. 72. № 3. P. 253-281. <https://doi.org/10.31577/GeolCarp.72.3.5>.

Melnyk L.I., Svidersky V.A. POLYMER COMPOSITE MATERIAL BASED ON PEARLITE

The purpose of this work was the creation of polymer composite materials with an increase in the concentration of the filler and the use of associated products of volcanic rock mining. The object of the study was composite materials using perlite as a filler and Latex 2012 copolymer as a matrix. The work methodology included a combination of physical and chemical methods of analysis of raw materials and their composites with technological testing of material properties, including chemical, granulometric, infrared, thermal, and electron microscopic analyses. According to the wettability of filler particles with polar and non-polar liquids (water and xylene, respectively), the filtration coefficients, lyophilicity and specific effective surface were determined. The peculiarities of the granulometry and shape of perlite particles, including those close to nanosize, the degree of lyophilicity (coefficient – 0.69) and the energy state of the surface at a specific area of 2.89 m²/g (by xylene) of the filler as factors of interaction with the polymer matrix were determined.

The peculiarities of the structure formation of polymer composites when using siftings of perlite mining as a filler and varying its concentration in the range of 65-90 wt. %. The peculiarities of the formation of the pore structure of the investigated composites were considered, including the increase in total porosity by 4.7 times when the ratio of filler and binder concentrations changed from 1.9 to 9.0.

The dependence of indicators of physical and mechanical properties of composites on the concentration of perlite screenings was established, and the possibility of increasing the strength, increasing the deformation and abrasion resistance of the created materials was shown.

Among the performance characteristics of the material, a significant reduction in abrasion resistance (≤ 0.06 g/cm²), which determines increased abrasion resistance, and a decrease in the values of residual deformation during compression, which indicates an increase in deformation resistance, are important.

The created polymer composites are promising for practical use in technical means and construction.

Key words: composite, filler, perlite, concentration, copolymer, porosity, properties.

Фролова Л.А.

Український державний університет науки і технологій

Мандрика А.Г.

Український державний університет науки і технологій

Родін Д.О.

Український державний університет науки і технологій

Нікітін М.О.

Український державний університет науки і технологій

Фролов О.О.

Український державний університет науки і технологій

СТРУКТУРНІ ТА МАГНІТНІ ВЛАСТИВОСТІ МОДИФІКОВАНИХ НАНОЧАСТИНОК ФЕРИТУ КОБАЛЬТУ

Протягом багатьох років зберігається інтерес дослідників до розробки нових та вдосконалення існуючих технологій отримання фериту кобальту. Це пов'язано з появою нових сфер його використання. Серед численних методів, що застосовуються на практиці, хороші результати отримано з використанням гідروفазних технологій. Можливості застосування різноманітних технологій для регулювання структурних, магнітних, технологічних властивостей величезні. У цьому випадку стає можливим отримання нанодисперсних частинок, що володіють набором специфічних властивостей. В даній роботі магнітні наночастинки модифікованого фериту кобальту $Fe-CoFe_2O_4$ були синтезовані шляхом обробки співсаджених гідроксидів в реакторі високого тиску. Морфологію та елементний склад зразків досліджували за допомогою скануючого електронного мікроскопа JSM-6390LV та енергодисперсійного спектрометра AZtecEnergy X-taxN50. Дослідження магнітних властивостей нанопорошків фериту кобальту проводили методом вібраційної магнітометрії. Інфрачервоні спектри з Фур'є перетворенням були зареєстровані за кімнатної температури в області $400-4000\text{ см}^{-1}$ з використанням спектрофотометра Spectrum One в таблетках KBr. Встановлено, що отримані наночастинки композитів $Fe-CoFe_2O_4$ мають складний фазовий склад. Середній розмір частинок, який оцінювали методом скануючої електронної мікроскопії, складає $\sim 90-100\text{ нм}$, що збігається з розрахованими значеннями розміру кристалітів, отриманими з даних рентгенофазового аналізу. Розмір кристалітів, визначений за різними методиками склав $L_{311}=937\text{ \AA}$, $L_{440}=1041\text{ \AA}$, $L=1046\text{ \AA}$. Значення намагніченості насичення, що визначено з петлі гістерезису складає $189\text{ A m}^2/\text{кг}$. Значення коерцитивної сили становить близько 602 Ерстед , яке значно вище, ніж коерцитивність фериту кобальту, одержаного іншими методами.

Ключові слова: ферити, намагніченість насичення, коерцитивна сила, кристаліти.

Постановка проблеми. Наночастинки фериту кобальту привертають увагу дослідників через його високу коерцитивність, високу кристаллографічну анізотропію та помірну намагніченість насичення [1]. Ферити кобальту мають структуру шпінелі із загальною формулою AB_2O_4 , яка представляє два можливі варіанти, нормальна шпінель і структура оберненої шпінелі. Однак існує безліч можливих проміжних варіантів розподілів, представлених загальною формулою $(A_{1-\gamma}B_\gamma)(A_\gamma B_{2-\gamma})O_4$ (γ – це ступінь оберненості) [2]. Це дає змогу регулювати магнітні властивості феритів. Звичайно

структурні особливості залежать від технології одержання фериту кобальту та хімічного складу.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Можливості використання різноманітних технологій для регулювання структурних, магнітних, технологічних властивостей величезні [3-8]. У цьому випадку стає можливим отримання нанодисперсних частинок, що володіють набором специфічних властивостей [9-11].

Автори [12-14] використовували метод співсадження при синтезі фериту кобальту. Останнім часом цей метод був модифікований таким

чином, щоб синтезувати нанорозмірні сполуки за допомогою додаткової гідротермічної, ультразвукової або термічної обробки. У деяких випадках цитрати, тартрати або оксалати використовуються як перспективні прекурсори, які передбачають високотемпературну обробку попередньо отриманого золю.

Застосування гідротермального синтезу за високому тиску має великі переваги у разі необхідності приготування нанодисперсних порошків. В даний час наявний величезний експериментальний матеріал носить не систематизований характер через складність досліджуваних систем. Розглянута технологія приваблює гарною відтворюваністю, простотою апаратної конструкції та можливістю регулювання параметрів процесу.

Постановка завдання. Метою даного дослідження є встановлення можливості отримання фериту кобальту за допомогою співосадження та гідротермальної обробки у реакторі високого тиску та оцінювання можливості регулювання властивостей отриманого продукту, визначення структури, морфології та магнітних властивостей наночастинок фериту кобальта. У ході попередніх досліджень встановлено, що саме технологічні параметри істотно впливають на перебіг реакції та склад одержуваних продуктів.

Виклад основного матеріалу.

1. Методики проведення експерименту

Виробництво співосаджених сполук здійснювали при безперервному перемішуванні відповідної суміші розчинів сульфатів з необхідним співвідношенням катіонів, як у фериті. Використовували 0,5 М розчини солей заліза та кобальту ч.д.а. Отриманий золь обробляли у реакторі високого тиску (ВТР).

Дослідження фазового складу зразків проводили на рентгенівському дифрактометрі ДРОН-2.0 в Co-K_α -монохроматичному випромінюванні. Сканування проводили при кімнатній температурі в діапазоні кутів $5-90^\circ$, період = 0,04 с.

Значення постійної ґратки параметра a_{th} , для CoFe_2O_4 визначали за положенням головного піку, використовуючи співвідношення

$$d = \frac{a_{th}}{h^2 + k^2 + l^2} \quad (1)$$

де d – міжплощинний відстань, h , k і l – індекси Міллера; отримані значення постійної ґратки.

Для всіх зразків була використана формула Шеррера для розрахунку середнього розміру L кристалітів:

$$L = \frac{0.89 \cdot \lambda}{\beta \cdot \cos \theta} \quad (2)$$

де λ – довжина рентгенівської хвилі; θ – кут дифракції Бреґга, β – повна ширина на половині максимуму (FWHM).

Морфологію та елементний склад зразків досліджували за допомогою скануючого електронного мікроскопа JSM-6390LV та енергодисперсійного спектрометра AZtecEnergy X-maxN50.

Дослідження магнітних властивостей нанопорошків фериту кобальту проводили методом вібраційної магнітометрії.

Інфрачервоні спектри з Фур'є перетворенням були зареєстровані за кімнатної температури в області $400-4000 \text{ cm}^{-1}$ з використанням спектрофотометра Spectrum One (Perkin Elmer) в таблетках КВг.

2. Результати та обговорення

На рисунку 1 представлена рентгенограма зразка, синтезованого у ВТР. Спостерігаються дуже інтенсивні піки фериту кобальту зі шпінельною структурою та присутні також піки, що відповідають $\alpha\text{-Fe}$. Дані РФА досить добре узгоджуються зі стандартними значеннями для CoFe_2O_4 (JCPDS: 22-1086). Різке збільшення кристалічності феритових порошків кобальту спостерігається у порівнянні зі зразками, що отримують за низьких температур [15].

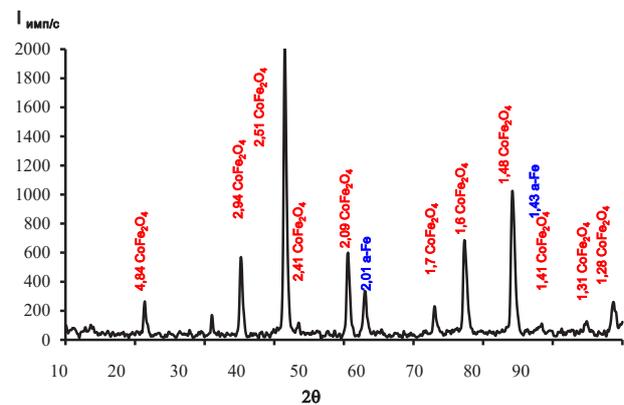


Рис. 1. Рентгенівська дифрактограма зразка

На рис. 2 показані СЕМ зображення зразку. Можна помітити незначну агломерацію частинок, середній розмір частинок $\sim 90-100 \text{ nm}$, що збігається з розрахованими значеннями розміру кристалітів, отриманими з даних РФА. Розмір кристалітів, визначений за різними методиками склав $L_{311}=937 \text{ \AA}$, $L_{440}=1041 \text{ \AA}$, $L=1046 \text{ \AA}$. Параметр кристалічної решітки дорівнює $a=8,3901 \text{ \AA}$, і відповідає параметру решітки фериту кобальту.

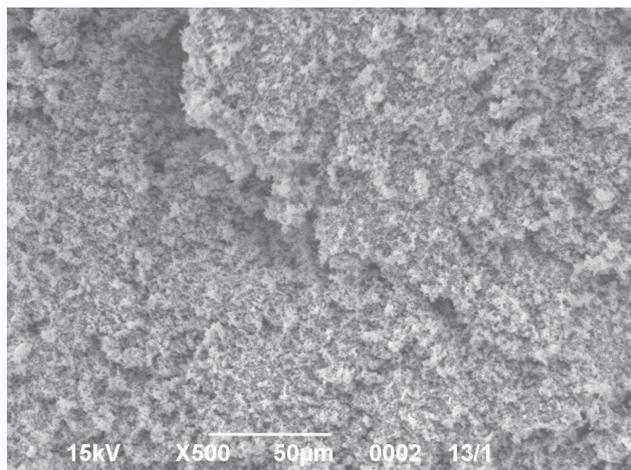


Рис. 2. СЕМ зображення наночастинок отриманого зразку

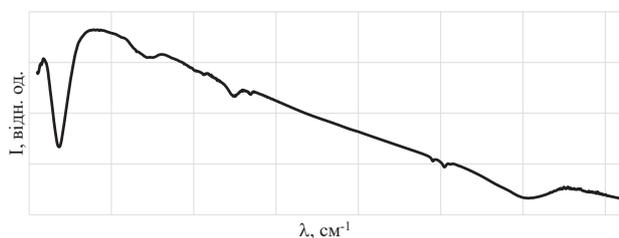


Рис. 3. Фур'є спектри наночастинок зразку

Важливо зазначити, що агрегація частинок є однією найважливіших технологічних проблем, яку вирішують рідиннофазні технології.

Фур'є спектри наночастинок зразку в діапазоні хвильового числа 4000-400 cm^{-1} , показані на рис. 3. Чітко проявляється інтенсивне поглинання за хвильових чисел 3447, 1651, 1124, 584 cm^{-1} . Остання група відноситься до коливань катіонів в тетраедричних позиціях у CoFe_2O_4 [13].

Намагніченість насичення зразку складає 189 $\text{A m}^2/\text{kg}$, що значно вище ніж спостерігається

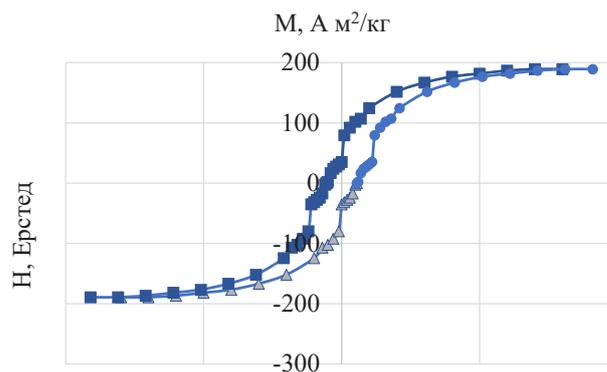


Рис. 4. Петля магнітного гістерезиса зразка

для фериту кобальту. Це пов'язано з присутністю металічного заліза і утворенням композиту $\text{Fe}/\text{CoFe}_2\text{O}_4$, наявність феромагнетика підвищує магнітні властивості. Коерцитивна сила складає 602 Ерстед. Це значно вище значень, наведених у [15]. Відомо, що дрібнодисперсні ферити мають особливі магнітні властивості. Величина коерцитивної сили зростає зі збільшенням розміру кристалітів. Залежність коерцитивної сили від розміру частинок екстремальна, можна припустити, що причинами збільшення H_c є анізотропія форми частинок, магнітна анізотропія та розмір кристалітів.

Висновки. Магнітні наночастинок композиту $\text{Fe-CoFe}_2\text{O}_4$ були синтезовані шляхом обробки співосаджених гідроксидів і пгидротермальної обробки. Середній розмір частинок, оцінені методом СЕМ мікроаналізу складали 90-100 нм для зразка. Магнітні властивості демонструють високі значення намагніченості насичення 189 $\text{A m}^2/\text{kg}$. Значення H_c становить близько 602 Ерстед, яка значно вища, ніж коерцитивність фериту кобальта, одержаного іншими методами.

Список літератури:

1. Sharifianjazi F., Moradi M., Parvin N., Nemati A., Rad A. J., Sheysi N., Asl M. S. Magnetic CoFe_2O_4 nanoparticles doped with metal ions: a review. *Ceramics International*, 2020.46(11), Pp. 18391-18412. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2020.04.202>
2. Abbas Y. M., Mansour S. A., Ibrahim M. H., Ali S. E. (). Microstructure characterization and cation distribution of nanocrystalline cobalt ferrite. *Journal of magnetism and magnetic materials*. 2011. 323(22), Pp.2748-2756. doi:10.1016/j.jmmm.2011.05.038
3. Benlembarek M., Salhi N., Benrabaa R., Djaballah A. M., Boulahouache A., Trari, M. Synthesis, physical and electrochemical properties of the spinel CoFe_2O_4 : application to the photocatalytic hydrogen production. *International Journal of Hydrogen Energy*. 2022. 47(15), Pp.9239-9247. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2021.12.270>
4. Ansari M.A., Govindasamy R., Begum M.Y., Ghazwani M., Alqahtani A., Alomary M.N., Baykal A. Bioinspired ferromagnetic CoFe_2O_4 nanoparticles: Potential pharmaceutical and medical applications. *Nanotechnology Reviews*. 2023. 12(1), Pp.20230575. <https://doi.org/10.1515/ntrev-2023-0575>
5. Kushwaha P., Chauhan P. Facile green synthesis of CoFe_2O_4 nanoparticles using hibiscus extract and their application in humidity sensing properties. *Inorganic and Nano-Metal Chemistry*. 2021. Pp.1-8. <https://doi.org/10.1080/24701556.2021.1992432>

6. A Kareem H., Zaidi M., Ameen Baqer A., K Hachim S., Ghazuan T., Kadhim Alasedi K., MA Dahesh S. Synthesis and characterization of CoFe_2O_4 nanoparticles and its application in removal of reactive violet 5 from water. *Journal of Nanostructures*. 2022. 12(3), Pp.521-528. 10.22052/JNS.2022.03.005
7. Rani B., Nayak A. K., Sahu N. K. Electrochemical supercapacitor application of CoFe_2O_4 nanoparticles decorated over graphitic carbon nitride. *Diamond and Related Materials*. 2021. 120, Pp.108671. <https://doi.org/10.1016/j.diamond.2021.108671>
8. Abraime B., El Maalam K., Fkhar, L., Mahmoud A., Boschini F., Tamerd M. A., Mounkachi O. Influence of synthesis methods with low annealing temperature on the structural and magnetic properties of CoFe_2O_4 nanopowders for permanent magnet application. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*. 2020. 500, Pp.166416. <https://doi.org/10.1016/j.jmmm.2020.166416>
9. Modabberasl A., Pirhoushyaran T., Esmaeili-Faraj S. H. Synthesis of CoFe_2O_4 magnetic nanoparticles for application in photocatalytic removal of azithromycin from wastewater. *Scientific Reports*. 2022. 12(1), Pp.19171. <https://doi.org/10.1038/s41598-022-21231-2>
10. Benali A., Saher L., Bejar M., Dhahri E., Graca M. F. P., Valente M. A., Costa, B. F. O. CoFe_2O_4 spinel ferrite studies on permanent magnet application and cytotoxic effects on breast and prostate cancer cell lines. *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*. 2023. 34(1), Pp.53. <https://doi.org/10.1007/s10854-022-09398-w>
11. Benali A., Saher L., Bejar M., Dhahri E., Graca M. F. P., Valente M. A., ... & Costa B. F. O. CoFe_2O_4 spinel ferrite studies on permanent magnet application and cytotoxic effects on breast and prostate cancer cell lines. *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*. 2023. 34(1), Pp.53. <https://doi.org/10.1007/s10854-022-09398-w>
12. Basak M., Rahman M. L., Ahmed M. F., Biswas B., Sharmin N. Calcination effect on structural, morphological and magnetic properties of nano-sized CoFe_2O_4 developed by a simple co-precipitation technique. *Materials Chemistry and Physics*. 2021. 264, Pp.124442. <https://doi.org/10.1016/j.matchemphys.2021.124442>
13. Revathi J., Abel M. J., Archana V., Sumithra T., Thiruneelakandan, R. Synthesis and characterization of CoFe_2O_4 and Ni-doped CoFe_2O_4 nanoparticles by chemical Co-precipitation technique for photo-degradation of organic dyestuffs under direct sunlight. *Physica B: Condensed Matter*. 2020. 587, Pp.412136. <https://doi.org/10.1016/j.physb.2020.412136>
14. Kafi-Ahmadi L., Khademinia S., Najafzadeh Nansa M., Alemi A. A., Mahdavi M., Poursattar Marjani A. Co-precipitation synthesis, characterization of CoFe_2O_4 nanomaterial and evaluation of its toxicity behavior on human leukemia cancer K562 cell line. *Journal of the Chilean Chemical Society*. 2020. 65(2), Pp. 4845-4848. <http://dx.doi.org/10.4067/S0717-97072020000204845>
15. Biswal D., Peeples B. N., Peeples C., Pradhan A. K. Tuning of magnetic properties in cobalt ferrite by varying Fe^{+2} and Co^{+2} molar ratios. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*. 2013. 345, 1-6. <https://doi.org/10.1016/j.jmmm.2013.05.052>

Frolova L.A., Mandryka A.G., Rodin D.O., Nikitin M.O., Frolov O.O. STRUCTURAL AND MAGNETIC PROPERTIES OF MODIFIED COBALT FERRIT NANOPARTICLES

For many years, researchers have been interested in developing new and improving existing technologies for producing cobalt ferrite. This is due to the emergence of new areas of its use. Among the numerous methods used in practice, good results have been obtained using hydrophase technologies. The possibilities of applying various technologies to regulate structural, magnetic, and technological properties are enormous. In this case, it becomes possible to obtain nanodispersed particles with a set of specific properties. In this work, magnetic nanoparticles of modified cobalt ferrite $\text{Fe-CoFe}_2\text{O}_4$ were synthesized by processing coprecipitated hydroxides in a high-pressure reactor. The morphology and elemental composition of the samples were studied using a JSM-6390LV scanning electron microscope and an AZtecEnergy X-maxN50 energy dispersive spectrometer. The magnetic properties of cobalt ferrite nanopowders were studied using vibrational magnetometry. Fourier transform infrared spectra were recorded at room temperature in the range of $400\text{-}4000\text{ cm}^{-1}$ using a spectrophotometer in KBr tablets. It was established that the obtained nanoparticles of $\text{Fe-CoFe}_2\text{O}_4$ composites have a complex phase composition. The average particle size, which was estimated by the method of scanning electron microscopy, is $90\text{-}100\text{ nm}$, which coincides with the calculated values of the crystallite size obtained from the X-ray phase analysis data. The size of the crystallites determined by various methods was $L_{311}=937\text{ \AA}$, $L_{440}=1041\text{ \AA}$, $L=1046\text{ \AA}$. The saturation magnetization value determined from the hysteresis loop is 189 Emu/g . The value of the coercive force is about 602 Oe , which is much higher than the coercivity of cobalt ferrite obtained by other methods.

Key words: ferrites, saturation magnetization, coercive force, crystallites.

ТЕХНОЛОГІЯ ХАРЧОВОЇ ТА ЛЕГКОЇ ПРОМИСЛОВОСТІ

УДК [621.798.13:678.742.2-027.33]:006.83
DOI <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2024.4/44>

Павлюк С.К.

Український державний університет науки і технологій

Суша І.В.

Український державний університет науки і технологій

ЕКОЛОГІЧНІ АСПЕКТИ ТАРИ: ПРОБЛЕМА ПЕТ ТАРИ ТА ЇЇ УТИЛІЗАЦІЯ

У харчовій промисловості для пакування продукції використовують різні види тари, яка створює велику екологічну проблему у світі. Тара виготовляється з різноманітної сировини: скла, паперу, фольги, полімерних і комбінованих матеріалів. Спеціалістами виконуються дослідження різних типів пакувань з метою оцінювання їхнього ризику та негативного впливу на організм людини. Використання полімерної тари, у тому числі з поліетилентерефталату (ПЕТ), призводить до великої кількості відходів. У статті досліджено питання переробки ПЕТ відходів. Розглянуто проблеми ПЕТ тари та її утилізації. У статті приділена велика увага цій проблемі як з екологічного, так і з економічного погляду. Доведено, що пляшки харчового призначення, як й інші види тари, слугують потенційним джерелом забруднення, з них у харчові продукти можуть мігрувати шкідливі речовини. Зроблено висновки що зростання обсягів виробництва та споживання ПЕТ-тари призводить до необхідності вдосконалення технологій її переробки з метою зменшення екологічного впливу. Відходи ПЕТ-тари є серйозною екологічною проблемою через їх велику кількість та повільний розклад. Утилізація та переробка є необхідними для зменшення негативного впливу на навколишнє середовище. Вторинна ПЕТ-тара може бути використана для пакування харчових продуктів з урахуванням вимог щодо міграції хімічних речовин та забезпечення безпеки продуктів. Підвищення уваги до проблеми міграції хімічних речовин з пакувального матеріалу до продуктів харчування відкриває можливості для дослідження нових методів переробки та використання безпечних альтернативних матеріалів. Стаття аналізує сучасні методи утилізації ПЕТ тари, такі як механічна та хімічна переробка, а також інноваційні підходи до зменшення використання пластику, включаючи біорозкладні матеріали та повторне використання. Обговорюються також проблеми, пов'язані з низьким рівнем переробки ПЕТ тари в деяких регіонах, і пропонуються рекомендації для покращення ситуації, зокрема впровадження більш ефективних систем збору та переробки, а також підвищення екологічної свідомості населення. Застосування вторинної ПЕТ-тари в харчовій промисловості вимагає постійного моніторингу та вдосконалення технологій, щоб забезпечити високу якість та безпеку продуктів для споживачів.

Ключові слова: поліетилентерефталат, тара, проблеми ПЕТ тари, утилізація, екологічні аспекти.

Постановка проблеми. На сьогоднішній день кількість сміття з кожним роком зростає. Особливо це стосується пакування харчових продуктів, яке виготовляється з різних матеріалів, таких як скло, папір, фольга, полімерні і комбіновані матеріали. Експерти проводять дослідження різних типів упаковки для оцінки їхнього потенційного впливу на здоров'я людини та навколишнє середовище.

Одним із основних джерел забруднення є полімерна тара, зокрема виготовлена з ПЕТ. Використання такої тари призводить до значної кількості

відходів, які потрібно ефективно утилізувати та переробляти. Це важливе завдання з екологічної та економічної точок зору.

Серед широкого асортименту продуктів, що виготовляються з вторинного ПЕТ-матеріалу, зокрема пляшки харчового призначення, є потенційним джерелом забруднення. З них можуть мігрувати шкідливі речовини до харчових продуктів, що становить серйозну загрозу для здоров'я споживачів. Тому необхідно проводити дослідження та розробляти більш екологічно безпечні та нешкідливі альтернативи упаковки для змен-

шення негативного впливу на навколишнє середовище та здоров'я людини.

Сучасна проблема полягає у необхідності дослідження безпеки використання полімерних матеріалів, що виготовлені з вторинної сировини ПЕТ, для упаковки харчових продуктів, з огляду на можливу міграцію токсичних компонентів з них. Враховуючи ріст використання вторинної сировини для зменшення відходів та екологічних аспектів, важливо провести детальні дослідження та встановити стандарти безпеки для забезпечення здоров'я споживачів.

Виділення недосліджених частин загальної проблеми. Виробництво ПЕТ тари має суттєвий вплив на навколишнє середовище через використання обмежених природних ресурсів, значні енергетичні витрати та викиди шкідливих речовин. Основні екологічні аспекти, пов'язані з виробництвом ПЕТ тари, включають наступне:

Використання сировини: для виробництва ПЕТ тари необхідні значні обсяги сировини, такі як етиленгліколь та терефталева кислота. Отримання цих речовин часто пов'язане з видобутком та переробкою нафти, що може призводити до забруднення довкілля.

Використання енергії: процеси виробництва ПЕТ тари потребують значних енергетичних ресурсів. Використання енергії зазвичай супроводжується викидами парникових газів та інших забруднюючих речовин.

Викиди: виробництво ПЕТ тари може призводити до викидів шкідливих речовин, таких як діоксини та оксиди азоту, які негативно впливають на якість повітря та здоров'я людей.

Відходи: великі обсяги відходів генеруються в процесі виробництва ПЕТ тари, таких як обрізки та відпрацьований матеріал. Якщо ці відходи не переробляються або використовуються повторно, вони можуть негативно впливати на довкілля.

Використання води: процеси виробництва ПЕТ тари можуть вимагати значних обсягів води для охолодження та промивання обладнання. Використання води може призводити до вичерпання водних ресурсів та забруднення водних джерел [1].

Загальний огляд екологічних аспектів використання та утилізації ПЕТ тари свідчить про необхідність подальших досліджень у цій області та розробки ефективних стратегій управління відходами. Дослідження альтернативних матеріалів для упаковки та розвиток більш ефективних систем утилізації можуть сприяти зменшенню негативного впливу ПЕТ тари на навколишнє середовище.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Під час дослідження екологічних аспектів тари було використано праці як іноземних, так і вітчизняних науковців. Наукові дослідження присвячені темам екологічним аспектам діяльності підприємств, а також їхнім актуальним проблемам. У роботах розглядаються перспективи розвитку екологічної відповідальності підприємств, завдання екологічного менеджменту та екологічна політика компаній.

Наприклад, О. Гусева та Н. Марценюк аналізують поточний стан і перспективи розвитку соціальної відповідальності бізнесу, тоді як Л. Бобко та О. Гришнова акцентують увагу на ролі дотримання екологічних стандартів у межах соціальної відповідальності. А. Кузнецова, Л. Семів та З. Скринник обговорюють важливість питання у контексті інноваційного та соціально-гуманітарного розвитку, зокрема підвищення ефективності екологічно відповідальних практик.

Зарубіжні дослідники, такі як С. Newman, J. Rand, F. Tarp та N. Trifkovic, вивчають значення корпоративної відповідальності для розвитку підприємницьких структур. G. Briggs, B. Dale та N. Stylianou розглядають можливості попередження екологічних катастроф та запобігання їм, підкреслюючи, що ці загрози є ключовими для збереження нашої планети.

Метою роботи є вирішення актуальної проблеми утилізації ПЕТ тари та вдосконалення технології рециклінгу, створення наукових засад та новітніх методів переробки ПЕТ-тари та застосування оброблених відходів ПЕТ і керованої зміни властивостей полімерних матеріалів.

Виклад основного матеріалу. Система роздільного збору сміття, законодавчо затверджена в Європі, дозволяє значно зменшити кількість відходів, які потрапляють на звалища, попередньо сортуючи їх та знижуючи до 5% від загального обсягу сміття великих міст. При цьому 95% відходів використовується для утилізації. На жаль, ситуація в країнах пострадянського простору, зокрема в Україні, суттєво відрізняється: лише 5% відходів направляються на переробку. Це призводить до постійного збільшення кількості звалищ у передмістях кожного року [2].

Утилізація полімерів дає їм друге життя, що є не лише економічно вигідним для тисяч підприємств, а також важливим внеском у збереження навколишнього середовища. Поєднання економічних та екологічних переваг робить систему пакувального бізнесу не лише комерційно вигідною, а й благородною з позиції збереження довкілля [3].

Пластик, особливо ПЕТ, який використовується, здебільшого, для виготовлення пляшок, є одним з найпоширеніших матеріалів у світі. В Україні лише з близько 60 тисяч тонн такої сировини на рік виробляють щонайменше 800 мільйонів пляшок (за деякими оцінками ця цифра є вдвічі більшою), а споживання ПЕТ зростає у країні на не менше ніж 20% щорічно. Проте лише близько 3% використаного поліетилентерефталату піддається вторинній переробці, і більшість сировини відправляється на сміттєзвалища твердих побутових відходів (ТПВ).

У країнах Європейського Союзу згідно з Директивою Єврокомісії від 2006 року утилізується та переробляється від 55 до 70% полімерних пакувальних матеріалів. Наприклад, Німеччина щорічно переробляє більше 400 тисяч тонн використаного ПЕТ, проте, значно поступається перед лідерами у цій галузі, такими як Австрія, Бельгія, Франція, Італія та Швейцарія. Приблизно п'яту частину вторинного ПЕТ країн ЄС експортують, головним чином, в Південно-Східну Азію [4].

На підприємствах Азії, таких як Тайвань, Китай, Японія та Південна Корея, значна кількість ПЕТФ переробляється у текстильне волокно, штапельне волокно, покриття для підлоги, покрівельні матеріали, деталі освітлювальних приладів, коробки для яєць, одноразові квіткові горщики та спортивний інвентар. В Україну щомісяця імпортується понад 10 тисяч тонн ПЕТ грануляту, більша частина якого використовується для виробництва пляшок, що з часом перетворюються на відходи. Однак сумарні потужності з переробки відходів ПЕТФ в Україні дозволяють впоратися лише з 1 тисячею тонн на місяць [5].

Виробництво пластівців має низьку рентабельність і, в основному, забезпечується переробкою великих обсягів полімерної продукції, що в основному експортується. Основними напрямками експорту ПЕТ – пластівців є ринки Азії та Близького Сходу. Виробництво грануляту з вторинної сировини потребує значних інвестицій, проте є високорентабельним [6].

Розвиток промисловості переробки полімерів призводить до збільшення обсягу споживання та розширення асортименту полімерних матеріалів та композитів на їх основі. Однак виникає потреба в створенні нових типів полімерних матеріалів з певними контрольованими властивостями для різних галузей застосування.

Вторинна переробка виробів з полімерних матеріалів стає дедалі більш важливою, оскільки вона вирішує актуальні завдання, такі як збере-

ження навколишнього середовища та економічна доцільність [7].

Найпоширенішим застосуванням полімерів за останні два десятиліття є ПЕТ, який має чудові хімічні та фізичні властивості для багатьох застосувань, наприклад, властивість газового бар'єру, низьку дифузію, чудові механічні та термомеханічні властивості, високу інертність матеріалу, прозорість і тонке виконання процесу [8-11].

З іншого боку, ПЕТ-відходи вже є важливими для людини та навколишнього середовища. Загальна кількість пластикових відходів, утворених у світі з 1950 по 2015 рік, становила приблизно 6,3 мільярда тонн, близько 9% з яких було перероблено, 12% спалено, а 79% накопичена на звалищах або в природному середовищі [12]. Щороку приблизно мільйон метричних тонн ПЕТ-відходів потрапляє в океан і на звалища. В даний час методи переробки пластику включають захоронення, спалювання, відновлення енергії та переробку. Мова йде про звичайні методи захоронення та спалювання, оскільки пластиковий компонент може звільнитись в навколишнє середовище під час обробки. Методи захоронення та спалювання мають викиди небезпечних речовин у навколишнє середовище [13-14]. Більшість пластмас не розкладаються або цей процес дуже довгий, ймовірно, сотні років; однак ніхто точно не знає, коли пластик розкладається на звалищі. За даними Агентства з охорони навколишнього середовища переробка пластику поділяється на три частини: використання безпосередньо; фізична переробка, наприклад, подрібнення, плавлення та реформування; хімічна обробка, коли компоненти виділяють і переробляють для використання в хімічній промисловості [15-17].

Можна застосувати кілька стратегій для зменшення відходів ПЕТ до 2040 року. Підхід до нульового забруднення пластиком поділяється на чотири критичні типи заходів: скорочення, заміна, переробка та утилізація. Крім того, можна реалізувати вісім заходів: – мінімізувати кількість одноразового використаного пластику;

- замінити нафтовий пластик іншим варіантом матеріалів і систем доставки;
- запровадити дизайн для переробки;
- підвищити потужність збору;
- збільшити потужність сортування та механічної переробки;
- збільшити потужність хімічного перетворення;
- мінімізувати витік у навколишнє середовище після збору;
- торгівля пластиком зменшиться [18-20].

Процес переробки ПЕТ може бути здійснений за допомогою механічних та хімічних процесів. Однією з головних ідей переробки ПЕТ є модифікація полімеру, щоб створити економічно придатні форми для повторного використання. Хімічна переробка ПЕТ широко застосовується в різних хімічних продуктах, таких як поліефірна формувальна маса, лаки, полімерна штукатурка, армовані фінішні покриття, розчини та мінеральні наповнювачі, волокно, поліол для поліуретанового еластомеру, поліуретани з низькою горючістю та піни [21].

Однак основною метою переробки ПЕТ є не лише зниження витрат на виробництво, а й збереження екологічного балансу для стійкості нашої планети. Важливо зазначити, що вартість хімічної переробки ПЕТ вища, ніж фізичної. Тому необхідний розвиток інноваційних технологій для забезпечення ефективної хімічної переробки ПЕТ [22-24].

Дана робота націлений на демонстрацію новітніх технологій переробки ПЕТ з метою зменшення відходів у навколишньому середовищі. Декілька досліджень вже виявили потенціал хімічної переробки ПЕТ для заміни традиційних методів захоронення та спалювання [25]. Дослідження кінетики хімічної переробки ПЕТ також проводиться

для отримання більш детальної інформації, що може сприяти створенню більш екологічно стійкого кінцевого продукту переробки ПЕТ [26].

Висновки. Зростання обсягів виробництва та споживання ПЕТ-тари призводить до необхідності вдосконалення технологій її переробки з метою зменшення екологічного впливу.

Відходи ПЕТ-тари є серйозною екологічною проблемою через їх велику кількість та повільний розклад. Утилізація та переробка є необхідними для зменшення негативного впливу на навколишнє середовище.

Вторинна ПЕТ-тара може бути використана для пакування харчових продуктів з урахуванням вимог щодо міграції хімічних речовин та забезпечення безпеки продуктів. Підвищення уваги до проблеми міграції хімічних речовин з пакувального матеріалу до продуктів харчування відкриває можливості для дослідження нових методів переробки та використання безпечних альтернативних матеріалів.

Застосування вторинної ПЕТ-тари в харчовій промисловості вимагає постійного моніторингу та вдосконалення технологій, щоб забезпечити високу якість та безпеку продуктів для споживачів.

Список літератури:

1. Raza M, Inayat A, Al Jaber B, Said Z, Ghenai C (2020) Simulation of the pyrolysis process using blend of date seeds and coffee waste as biomass. *IEEE*, New York, pp 1–5
2. Liu W, Tian Y, Yan H, Zhou X, Tan Y, Yang Y, Li Z, Yuan L (2021) Gasification of biomass using oxygen-enriched air as gasification agent: a simulation study. *Biomass Conv Biorefin*. <https://doi.org/10.1007/s13399-021-02035-2>
3. Hussain M, Zabiri H, Uddin F, Yusup S, Tufa LD (2021) Pilot-scale biomass gasification system for hydrogen production from palm kernel shell (part A): steady-state simulation. *Biomass Conv Biorefin*. <https://doi.org/10.1007/s13399-021-01474-1>
4. Andrady, A. L., & Neal, M. A. (2009). Applications and societal benefits of plastics. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, 364 (1526), 1977-1984
5. Hopewell, J., Dvorak, R., & Kosior, E. (2009). Plastics recycling: challenges and opportunities. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, 364(1526), 2115-2126
6. Goodship V. Plastic Recycling. *Science Progress*. 2007;90(4):245-268. doi:10.3184/003685007X228748
7. La Mantia, F. P., M. Morreale, L. Botta, M. C. Mistretta, M. Ceraulo, and R. Scaffaro. 2017. "Degradation of polymer blends: A brief review." *Polymer Degradation and Stability* 145:79-92. doi: <https://doi.org/10.1016/j.polymdegradstab.2017.07.011>.
8. Ubeda, S., Aznar, M., Nerín, C. (2018) Determination of oligomers in virgin and recycled polyethylene terephthalate (PET) samples by UPLC-MS-QTOF]. *Anal. Bioanal. Chem.*, 410, 2377–2384.
9. Welle, F. (2014) Food Law Compliance of Poly(ethylene Terephthalate) (PET) Food Packaging Materials. *In Food Additives and Packaging; ACS Symposium Series; American Chemical Society: Washington, DC, USA; Volume 1162*, pp. 167–195.
10. Li, B.; Wang, Z.-W.; Lin, Q.-B.; Hu, C.-Y. (2016) Study of the Migration of Stabilizer and Plasticizer from Polyethylene Terephthalate into Food Simulants. *J. Chromatogr. Sci.*, 54, 939–951.
11. Begley, T.H.; Biles, J.E.; Cunningham, C.; Piring, O. (2004) Migration of a UV stabilizer from polyethylene terephthalate (PET) into food simulants. *Food Addit. Contam.*, 21, 1007–1014.
12. Geyer, R.; Jambeck, J.R.; Law, K.L. (2017) Production, use, and fate of all plastics ever made. *Sci. Adv.*, 3, e1700782.

13. Hopewell, J.; Dvorak, R.; Kosior, E. (2009) Plastics recycling: Challenges and opportunities. *Philos. Trans. R. Soc. B Biol. Sci.* 2009, 364, 2115–2126.
14. Le, D.K.; Ng, G.N.; Koh, H.W.; Zhang, X.; Thai, Q.B.; Phan-Thien, N.; Duong, H.M. (2020) Methyltrimethoxysilane-coated recycled polyethylene terephthalate aerogels for oil spill cleaning applications. *Mater. Chem. Phys.*, 239, 122064.
15. Administration, F.D. (1992) *Points to Consider for the Use of Recycled Plastics: Food Packaging, Chemistry Considerations*; FDA Division of Food Chemistry and Technology Publication: Washington, DC, USA, Volume 410.
16. Nikles, D.E.; Farahat, M.S. (2005) New Motivation for the Depolymerization Products Derived from Poly(Ethylene Terephthalate) (PET) Waste: A Review. *Macromol. Mater. Eng.*, 290, 13–30.
17. Jankauskaite, V.; Macijauskas, G.; Lygaitis, R. (2008) Polyethylene terephthalate waste recycling and application possibilities: A review. *Mater. Sci. (Medzg.)*, 14, 119–127
18. Lau, W.W.Y.; Shiran, Y.; Bailey, R.M.; Cook, E.; Stuchtey, M.R.; Koskella, J.; Velis, C.A.; Godfrey, L.; Boucher, J.; Murphy, M.B.; et al. (2020) Evaluating scenarios toward zero plastic pollution, 369, 1455–1461.
19. Chowdhury, S.; Maniar, A.T.; Suganya, O. (2013) Polyethylene Terephthalate (PET) Waste as Building Solution. *Int. J. Chem. Environ. Biol. Sci.*, 1, 2320–4087.
20. Alaloul, W.S.; John, V.O.; Musarat, M.A. (2020) Mechanical and Thermal Properties of Interlocking Bricks Utilizing Wasted Polyethylene Terephthalate. *Int. J. Concr. Struct. Mater.*, 14, 1–11
21. Jankauskaite, V. (2016) Recycled Polyethylene Terephthalate Waste for Different Application Solutions. *Environ. Res. Eng. Manag.*, 72, 5–7.
22. Sanches, R.A.; Takamune, K.; Guimarães, B.; Alonso, R.; Baroque-Ramos, J.; de Held, M.S.B.; Marcicano, J.P.P. (2014) Wearability Analysis of knited fabrics produced with colored organic cotton. Bamboo rayon, corn, recycled pet/cotton and recycled pet/polyester. *Am.Int. J. Contemp. Res.*, 4, 28–37.
23. Shen, L.; Worrell, E.; Patel, M.K. (2010) Open-loop recycling: A LCA case study of PET bottle-to-fibre recycling. *Resour. Conserv. Recycl.*, 55, 34–52.
24. Kumartasli, S.; Avinc, O. *Important Step in Sustainability: Polyethylene Terephthalate Recycling and the Recent Developments*; Springer International Publishing: Cham, Switzerland, 2020; pp. 1–19.
25. Othmer, K. (1982) *Encyclopedia of Chemical Technology; Radiation Curing*; Wiley – Interscience: New York, NY, USA, 1982; Volume 15, pp. 607–624.
26. Forrest, M. (2016) *Recycling of Polyethylene Terephthalate*; Smithers Rapra: Shrewsbury, UK.

Pavliuk S.K., Sukha I.V. ECOLOGICAL ASPECTS REGARDING PACKAGING: THE PROBLEM OF PET PACKAGING, AND ITS DISPOSAL

In the food industry, various types of packaging are used, which create a significant environmental problem worldwide. Packaging is made from diverse raw materials: glass, paper, foil, polymer, and composite materials. Researchers conduct studies on different types of packaging to evaluate their risks and negative impact on human health. The use of polymer packaging, including polyethylene terephthalate (PET), leads to a large amount of waste. The article explores the issue of PET waste processing and discusses the problems of PET packaging and its disposal. The article pays great attention to this issue from both ecological and economic perspectives. It is proven that food-grade bottles, like other types of packaging, serve as a potential source of contamination, as harmful substances can migrate from them into food products. It was concluded that the increase in the volume of production and consumption of PET containers leads to the need to improve the technologies of its processing in order to reduce the environmental impact. Waste PET containers are a serious environmental problem due to their large amount and slow decomposition. Disposal and recycling are necessary to reduce the negative impact on the environment. Secondary PET containers can be used for packaging food products, taking into account the requirements for the migration of chemical substances and ensuring product safety. Increasing attention to the problem of migration of chemicals from packaging material to food opens up opportunities for research into new processing methods and the use of safe alternative materials. The article examines current methods of recycling PET containers, such as mechanical and chemical recycling, as well as innovative approaches to reducing the use of plastic, including biodegradable materials and reuse. Problems related to the low level of recycling of PET containers in some regions are also discussed, and recommendations are offered to improve the situation, in particular, the implementation of more efficient collection and recycling systems, as well as increasing the environmental awareness of the population. The use of secondary PET containers in the food industry requires constant monitoring and improvement of technologies to ensure high quality and safety of products for consumers.

Key words: polyethylene terephthalate, packaging, PET packaging issues, disposal, ecological aspects.

ТРАНСПОРТ

УДК 656.621/.626

DOI <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2024.4/45>**Биковець Н.П.**

Дунайський інститут Національного університету «Одеська морська академія»

АНАЛІЗ ТРАНСПОРТНИХ ПОТОКІВ ПО РІЧЦІ ДУНАЙ В УМОВАХ СЬОГОДЕННЯ

Водний транспорт, особливо морський, відіграє важливу роль у транспортній системі багатьох країн, оскільки є найбільш дешевим, зручним, екологічним та енергоефективним видом транспорту у порівнянні з автомобільним та залізничним транспортом. Внутрішній водний транспорт – важлива ланка у логістичному ланцюзі мультимодальних перевезень, яка дозволить без суттєвого забруднення навколишнього середовища перевозити вантажі найбільш економічним шляхом. Україна є важливим транспортним вузлом, що зв'язує Європу, Азію і Близький Схід. Річка Дунай, по якій реалізується більшість міжнародних перевезень, є зв'язуючою ланкою між Україною та багатьма європейськими державами. Тому розвиток річкового транспорту та активна судноплавна політика сприятимуть зростанню обсягів перевезень територією України.

У статті розглянуто Стратегію розвитку внутрішнього водного транспорту на 2021-2031 роки та план заходів з її реалізації. Наведено обсяги вантажопотоку у морських портах Одеської області, зокрема Дунайських портах – Рені, Ізмаїл та Усть-Дунайськ у розрізі сучасного становища у країні. Визначено, що за рахунок проведення у 2023 році днопоглиблювальних робіт (з 4 м до 6,5 м), річка Дунай посіла місце головної альтернативи «глибокій воді». З'ясовано, що процес замулювання каналів це не єдина перешкода для ефективної роботи водних шляхів. Так, наслідки глобального потепління через коливання рівнів води, посухи, що призводять до обміління Дунаю, впливають на осадку суден і, як наслідок, на економічну ефективність і безпеку судноплавства вздовж усієї річки. Зважаючи на кліматичні зміни, є кілька варіантів щодо вирішення даних проблем: ймовірну перевагу на річці можуть отримати менші за розмірами плоскодонні судна, хоча їх використання є економічно збитковим; доцільність планування з використання судна тільки в сезони з достатньою водністю.

Ключові слова: річковий транспорт, морський транспорт, ефективність, вантажообіг, внутрішні водні шляхи, стратегія.

Постановка проблеми. Водний транспорт, особливо морський, відіграє головну роль у розвитку світових господарських зв'язків. Морський транспорт є гарантом транспортної безпеки як зовнішньоекономічних так і внутрішньоекономічних відносин країни. Саме тому морські держави впроваджують та реалізують активну судноплавну політику. Річка Дунай сполучає Україну з багатьма європейськими державами. Переважна більшість міжнародних перевезень реалізується по р. Дунай. Сулінський канал – головна судноплавна протока гирла Дунаю в Румунії на початку повномасштабного вторгнення, навіть з низькою пропускною здатністю, став єдиним морським шляхом між Україною та іншими державами. Порти Ізмаїл та Рені входять до складу найбільших річкових портів України та в умовах сьогодення є основними перевізниками зерна, металу,

руди, добрив, олії. Через зростання вантажоперевалки постало питання щодо перспектив Дунайського портового кластеру і чи зможе він замінити експорт морем.

На ефективність роботи мережі внутрішніх водних шляхів (далі – ВВШ) річки Дунай впливають коливання рівню води, що є наслідком впливу глобального потепління. Зміни рівню води на окремих ділянках річки дуже відчутні для морсько-господарського комплексу через призупинення судноплавства, зміну морфології річки, замулювання, ушкодження берегів. Дослідження, проведені Міжурядовою групою експертів зі зміни клімату (The Intergovernmental Panel on Climate Change (далі – IPCC)) [1], виявили, що зростання температури повітря на 1,5-3,7°C призведе до подальшого підвищення рівня моря від 0,26 м до 0,82 м. Відповідно, дослідження сучасного стану

транспортних потоків по річці Дунай з урахуванням впливу навколишнього природного середовища набуває особливої актуальності.

Аналіз останніх досліджень і публікацій.

Явище значного скорочення пасажирського та вантажного перевезень річками України спостерігалось в останні три десятиріччя. Майже всі вантажні перевезення здійснюються залізничним і автомобільним транспортом, при тому, що річковий транспорт вважається найбільш екологічно чистим, безпечним і економічно вигідним видом транспорту. З метою підвищення значущості річкового транспорту Верховною Радою України у грудні 2020 року був прийнятий Закон «Про внутрішній водний транспорт» [2]. Відповідно до ст. 11 п. 1 «Розвиток внутрішніх водних шляхів здійснюється відповідно до Стратегії розвитку внутрішнього водного транспорту України...» [2], тому Міністерством інфраструктури України було підготовлено Стратегію розвитку внутрішнього водного транспорту (далі – Стратегія) на 2021-2031 роки та план заходів з її реалізації. У документі враховані сучасні тенденції з екологічності та мобільності транспорту, передбачене впровадження інноваційних енергоефективних та екологічних технологій на ВВШ, оновлення флоту та річкової інфраструктури, що сприятиме забезпеченню відповідності річкового флоту екологічним стандартам Європейського Союзу. У Стратегії описані кроки щодо розвитку сектору у напрямі використання річок для вантажних і пасажирських перевезень. Великі сподівання за підтримкою держави покладені на приватний сектор, на його залучення до здійснення вантажоперевезень річковим транспортом. За умови успішної реалізації даного проєкту до 2030 року перевезення річковою мережею можуть зрости майже утричі до 30-35 млн. тонн вантажу у порівнянні з показниками 2021 року. Проте одразу постає питання чи призведе збільшення річкового транспорту до збільшення забруднення річок, адже одним із завдань Стратегії розвитку внутрішнього водного транспорту є зниження забруднення, спричиненого сектором річкового транспорту, до нуля.

Питання функціонування внутрішнього водного транспорту у своїх роботах розглядають вітчизняні науковці А.Ю. Кулієв, В.В. Гаверський, Е.М. Деркач, П.В. Луб'яний, О.А. Войтович, О.М. Котлубай, Б.В. Буркинський, М.М. Петрушенко, В.В. Барішнікова, В.В. Жихарева, Г.М. Шевченко, Л.Л. Гриценко та інші [3, 4, 5, 6, 7, 8, 9]. Сучасні умови у сфері внутрішнього водного транспорту і прагнення створити необхідне

підґрунтя для функціонування і розвитку річкового транспорту та ефективної річкової логістики потребують переосмислення відповідних питань у науці.

Прослідковується безпосередня залежність ВВШ від зниження рівня води в періоди аномальної спеки. Згідно з прогнозами Міжурядової групи експертів зі зміни клімату до 2050 року транспортні можливості ВВШ Європи через зміну клімату істотно не скоротяться [1], проте в другій половині XXI століття зменшення стоку річок може призвести до скорочення періоду навігації, зменшенню вантажопідйомності, зростанню витрат на паливо (т/км) та збільшенню випадків посадки суден на міліну. Зміна рівня води в річках безпосередньо пов'язана з транспортними витратами. Так, у разі зменшення рівня води з 4 до 2 метрів транспортні витрати на 1 т/км збільшуються приблизно втричі, а при рівні води нижче 1,6 м використання внутрішнього водного транспорту стає практично неможливим [10].

Постановка завдання. Мета статті – провести аналіз транспортних потоків по річці Дунай в умовах сьогодення.

Виклад основного матеріалу дослідження.

Морський та річковий транспорт є однією з базових галузей економіки Придунайського регіону України, що розташований на перетині найважливіших міжнародних шляхів з Європи в Азію. Стабільне та ефективне функціонування морського та річкового транспорту є однією з необхідних складових забезпечення економічної стабільності, сталого розвитку української ділянки Придунайського регіону, реалізації потенціалу морського та річкового транспортно-логістичного комплексу та підвищення рівня життя населення даного регіону.

У цілому в Україні структура вантажоперевезень за видами транспорту відрізняється від аналогічної структури в інших європейських країнах, які можна порівняти з Україною за територією й наявністю великих судноплавних річок. Для прикладу – Румунія та Німеччина. Ці країни характеризуються значною часткою річкового транспорту – у 13-20%, в Україні ця частка становить всього 1%, що говорить про невикористання наявного потенціалу для розвитку річкового транспорту [11]. Позитивний досвід активного використання річкового транспорту країнами Європи демонструє наступні його переваги, такі як енергоефективність, дешевизна та екологічність. Адже європейський річковий транспорт у 1,5 рази менше споживає енергії у порівнянні із залізничним та аж у 3,5 рази менше ніж автомобільний

транспорт. Починаючи з 2009-2010 рр в Україні спостерігалось помітне зменшення затребуваності у річкових перевезеннях. Так, у 1991 р. обсяг вантажоперевезень водним транспортом становив 65 млн т/рік, у 2010 році – 7 млн т і у 2016 – 6 млн т/рік [12].

Стан розвитку морського транспорту України у світовому масштабі можна оцінити за допомогою міжнародних рейтингів. За методикою Всесвітнього економічного форуму одним із них є Індекс глобальної конкурентоспроможності [13]. Вагомим складником даного індексу є оцінка розвитку інфраструктури країни, у т.ч. за ознакою розвитку окремих складників транспортної системи. Оцінка водного транспорту виконується за показниками інтегрованості в міжнародні шляхи перевезення та ефективності роботи портів. Ці показники є складовими оцінки транспортної інфраструктури країни, що інтегрується в показник загального розвитку інфраструктури в країні. Серед 141 країни Україна у загальному рейтингу має наступні результати: 57 сходинка – загальний розвиток інфраструктури в країні; 57 положення – інтегрованість у міжнародні водні шляхи перевезення; 78 – ефективність роботи портів (данні на 2019 рік) [14]. Отже, є доцільність щодо реалізації заходів як на загальнодержавному, так і регіональному рівні з активізації сектору морегосподарського комплексу.

Для підвищення ефективності українських ВВШ необхідно провести модернізацію річкової причальної інфраструктури, що наразі використовується лише на 5-10% від своєї потужності. Перевага річкового транспорту полягає не лише в забезпеченні ефективних перевезень, а й у зменшенні негативного впливу на довкілля та скороченні транспортних заторів на автошляхах, тому розвиток і модернізація річкових маршрутів зроблять водний транспорт ще більш привабливим для бізнесу та логістики.

Річка Дунай є одним з основних ВВШ України. Відповідно до Європейської угоди про найважливіші внутрішні водні шляхи міжнародного значення (далі – УМВШ) [15] Дунай відноситься до річкових судноплавних маршрутів найвищої категорії Е. Вздовж р. Дунай розташовані три українських морських порти – Рені, Ізмаїл та Усть-Дунайськ. Глибоководний судновий хід «Дунай – Чорне море» включений до Переліку внутрішніх водних шляхів міжнародного значення (водний шлях категорії Е 80-09) УМВШ.

За даними ДП «Адміністрація морських портів України» у 2022 році портами України переванта-

жено понад 59 млн тонн вантажів: експортних – 47,8 млн тонн; імпортних – 6,2 млн тонн. З них зернові – 28,8 млн тонн, наливні – 4,8 млн тонн. З 1 серпня 2022 року (з початку роботи «зернового коридору») 614 суден експортували понад 16 млн тонн агропродукції до 40 країн світу. Загалом, у 2022 році морський транспорт України забезпечив 54% експорту [16]. Зокрема, у 2022 році Дунайські порти забезпечили ще більші обсяги вантажопереробки у порівнянні з 2021 роком:

- порт «Рені» – 6,82 млн тонн вантажів (у 2021 році – 1,37 млн тонн);
- порт «Ізмаїл» – 8,89 млн тонн вантажів (у 2021 році – 4 млн тонн);
- порт «Усть-Дунайськ» – 785 тис тонн вантажів (у 2021 році – 64 тис тонн).

З них зернові – 6,6 млн тонн, наливні – 2,3 млн тонн.

Проте через постійні штучні обмеження з боку росії пропускна спроможність до весни 2023 року скоротилась удвічі. Так, за час роботи «зернового коридору» із запланованого вантажопотоку в 57 млн тонн через нього було експортовано 32,9 млн тонн агропродукції [17], що відобразилось на показниках виконання фінансового плану підприємствами морегосподарського комплексу.

Початок функціонування проходу до портів України через район північно-західної частини Чорного моря в умовах дії режиму воєнного стану покращив вантажообіг у морських портах Дунайського регіону, що склав 32,02 млн тонн вантажів, з них агропродукція – 22,6 млн тонн. Завдяки проведеним днопоглиблювальним роботам (з 4 м до 6,5 м) вдалося практично удвічі збільшити пропускну спроможність українського каналу Бистре, а річка Дунай остаточно зміцнилась як головна альтернатива «глибокій воді» (рис. 1).

Річкове судноплавство – вид транспорту, що надто залежить від зміни клімату. Через посухи, що найчастіше трапляються з липня по вересень місяці, рух суден обмілілим Дунаєм обмежується. 2022 року обміління було більшим ніж у 2018 році, коли маловоддя побило 500-річний рекорд [18]. Погіршення клімату: надзвичайно посушливі зима та весна, що супроводжувалися рекордними літніми температурами та періодичними хвилями спеки, призвели до того, що основні водні шляхи Європи не поповнювались та дедалі частіше перегрівались. Так, у 2022 році Болгарія та Сербія були змушені взяти на себе величезний обсяг дорогих днопоглиблювальних робіт, щоб підтримувати судноплавний фарватер.

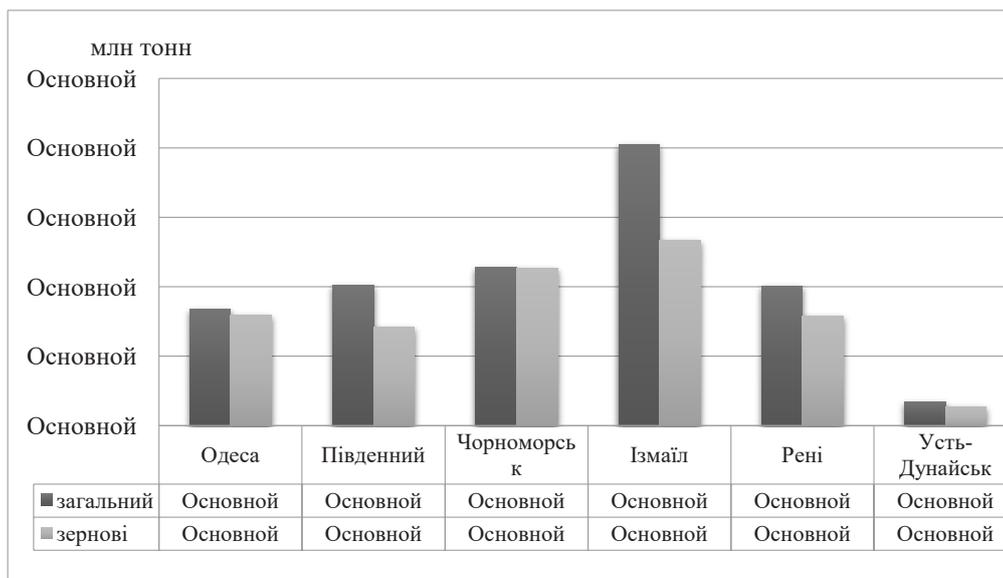


Рис. 1. Вантажообіг у морських портах у 2023 році

Джерело: складено автором за даними [16]

Як показали дослідження, шляхи адаптації до обміління є дуже обмеженими. Одним з рішень є прагнення до зменшення осадок суден. Через зниження рівня води економічні наслідки також викликають занепокоєння. «Основний флот для Дунайського судноплавства був побудований для роботи з робочою осадкою 2,5-2,7 метри. Зараз судна працюють з осадкою 1,4-1,7 метра. У певні періоди літньої мілководної фази навігація в критичних районах може бути перервана», – каже Петер Чакі, радник з гідротехнічних і гідрометеорологічних питань у Дунайській комісії [19]. Адже коливання рівнів води на р. Дунай та складність довгострокових прогнозів через відсутність опадів є однією з головних причин проблем у майбутньому розвитку водного транспорту на річці, оскільки низькі рівні води впливають на осадку суден і, як наслідок, на економічну ефективність і безпеку судноплавства по всій річці. Отже у майбутньому, зважаючи на кліматичні зміни, перевагу на річці отримують менші за розмірами плоскодонні судна, хоча їх використання є економічно збитковим.

Наступним рішенням є доцільність планування з використання судна тільки в сезони з достатньою водністю, перецікуючи посухи і використовуючи інші види транспорту в ці періоди [20].

Із зазначеного випливає, що інтенсифікація днопоглиблення і тим більше створення гребель для забезпечення судноплавних глибин економічно є вкрай затратними, а щодо екології прямо суперечать законодавству Євросоюзу, особливо враховую той факт, що днопоглиблювальні роботи були виключені із «Зеленої таксономії ЄС» – системи, що визначає для інвесторів ті види діяльності, які дозволять здійснити декарбонізацію економіки.

Висновки. Внутрішні водні перевезення є важливою складовою транспортної системи, забезпечуючи економічно вигідний і екологічно чистий спосіб перевезення різноманітних вантажів. У результаті аналізу було виявлено, що частка річкового транспорту в Україні становить всього лише 1%, у той час як в інших країнах Європи з подібним географічним положенням вона складає 13-20%. Причинами такого загрозливого стану ВВП України є критичне зменшення загальних обсягів перевезень вантажів річковим транспортом – у 5,4 разів, а також скорочення вантажообробки в річкових портах – у 4,5 рази. Тим не менш, розвиток ВВП в Україні має значний потенціал для сприяння економічному зростанню, зменшенню екологічного навантаження та розвантаженню наземної інфраструктури.

Список літератури:

1. IPCC, 2023: Sections. In: Climate Change 2023: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Core Writing Team, H. Lee and J. Romero (eds.)]. IPCC, Geneva, Switzerland, pp. 35-115, doi: 10.59327/IPCC/AR6-9789291691647. https://www.ipcc.ch/report/ar6/syr/downloads/report/IPCC_AR6_SYR_LongerReport.pdf

2. Закон України «Про внутрішній водний транспорт» від 03.12.2020 № 1054-IX. <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1054-20#Text>
3. П.В. Луб'яний, О.А. Войтович, І. О. Кузьменко. Розбудова національних внутрішніх водних шляхів // *Вісник Херсонського Національного технічного університету. Серія: Інженерні науки.* – 2023. № 2(85). – С. 44-48. <https://doi.org/10.35546/kntu2078-4481.2023.2.5>
4. А.Ю. Кулієв, В.В. Гаверський. Питання розвитку річкового транспорту у програмних документах довгострокового планування // *Правова держава. Серія: Морське право.* – 2022. № 47. – С. 49-56. DOI: <https://doi.org/10.18524/2411-2054.2022.47.265283>
5. Буркинський Б. Формування морської доктрини України / Б. Буркинський, О. Котлубай, В. Степанов // *Вісник Національної академії наук України.* - 2008. - № 9. - С. 6-11. - Режим доступу: http://nbuv.gov.ua/UJRN/vnanu_2008_9_3.
6. Petrushenko, Mykola, Burkynskyi, Borys, Shevchenko, Hanna and Baranchenko, Yevhen (2022) Towards sustainable development in a transition economy: The case of eco-industrial parks in Ukraine. *Environmental Economics*, 12 (1). pp. 149-164. ISSN 1998-6041. URL: [https://doi.org/10.21511/ee.12\(1\).2021.13](https://doi.org/10.21511/ee.12(1).2021.13)
7. PETRUSHENKO, M. M., & SHEVCHENKO, H. M. (2018). REGULATION OF ECOLOGIC-AND-ECONOMICAL RISKS AND THE RESPONSIBILITY FOR HUMAN WELL-BEING: FOR EXAMPLE OF WASTE MANAGEMENT. *Economic Innovations*, 20(3(68)), 165-174. [https://doi.org/https://doi.org/10.31520/ei.2018.20.3\(68\).165-174](https://doi.org/https://doi.org/10.31520/ei.2018.20.3(68).165-174)
8. Баришнікова В. В., Ковальжи Н. Г. Сучасні тенденції оптимізації світових транспортних потоків, економічний аспект // Сучасні підходи до вискоєфективного використання засобів транспорту: матеріали XII Міжн. наук.-практ. конф. Ізмаїл, 9-10 грудня 2021 р. – Запоріжжя: АА Тандем, 2021. – С. 470-472. ISBN 978-966-488-247-4. DOI:10.13140/RG.2.2.14310.55368
9. Теоретичні засади сталого розвитку підприємств водного транспорту: монографія / за заг. ред. д.е.н., проф. В.В. Жихаревої. Одеса: КУПІСНКО СВ, 2021. 185 с.
10. Биковець Н.П., Кірсанова В.В., Черкас О.А. Наслідки глобального потепління для внутрішніх водних шляхів: тенденція зміни рівня води річки Дунай // *Вчені записки Таврійського Національного університету ім. В.І.Вернадського. Серія: Технічні науки.* – 2020. Т. 31(70). – №3. – С. 90-97. DOI <https://doi.org/10.32838/TNU-2663-5941/2020.3-2/16>.
11. Сліпенко А.К., Манаєнко І.М. Розвиток річкового транспорту України в умовах світових тенденцій енергоефективності // Актуальні проблеми економіки і управління: 36. наук. праць. — К.: КПП ім. Ігоря Сікорського – Вип. 13. 2019. [Електронне видання]. <https://orcid.org/0000-0001-5003-5357>
12. Коли взяти річкою вигідніше і екологічніше. Веб-сайт: Економічна правда.: URL: <https://www.epravda.com.ua/columns/2021/06/29/675446/> (дата звернення: 20.07.2024).
13. The Global Competitiveness Report (2019). World Economic Forum. URL: <http://www3.weforum.org/docs/WEFTheGlobalCompetitivenessReport2019.pdf> (дата звернення: 20.07.2024).
14. Тимченко Н.М., Кузьменко О.Ю., Кузьменко В.С. Аналіз сучасного стану функціонування підприємств водного транспорту України та світу // Причорноморські економічні студії. *Серія: економіка та управління підприємствами.* – 2021. Випуск 64. – С.74-78. <https://doi.org/10.32843/bses.64-12>.
15. Європейська угода про найважливіші внутрішні водні шляхи міжнародного значення (УМВШ). Чинна для України від 05.04.2010. [Електронний ресурс]. – URL: https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/994_342?find=1&text=%D0%94%D1%83%D0%BD%D0%B0%D0%B9#w1_1 (дата звернення: 10.07.2024).
16. ДП «Адміністрація морських портів України». Фінплан та звітність. URL: <https://www.uspa.gov.ua/pro-pidpruyemstvo/finplan-ta-zvitnist>.
17. Зміцнення ППО, фактор Дунаю та власний коридор замість «зернового». *Forbes Ukraine.* [Електронний журнал]. – URL: <https://forbes.ua/money/zmitsnennya-ppo-faktor-dunayu-ta-vlasniy-koridor-zamist-zernovogo-yak-ukraini-ne-lishe-vdalosya-viboroti-morsku-galuz-z-leshchat-viyini-a-y-vidkriti-porti-dlya-importu-rozpovidae-logist-ivan-niyakiy-27122023-18163>.
18. Europe's rivers run dry as scientists warn drought could be worst in 500 years. URL: <https://www.theguardian.com/environment/2022/aug/13/europes-rivers-run-dry-as-scientists-warn-drought-could-be-worst-in-500-years> (дата звернення: 21.07.2024).
19. The Danube's historically low water levels are damaging both the environment and the economy. URL: <https://emerging-europe.com/news/the-danubes-historically-low-water-levels-are-damaging-both-the-environment-and-the-economy/> (дата звернення: 07.07.2024).
20. Should Ukraine continue building the Danube canal? URL: <https://uwecworkgroup.info/should-ukraine-continue-building-the-danube-canal/> (дата звернення: 30.06.2024).

Bykovets N.P. ANALYSIS OF TRAFFIC ON THE DANUBE RIVER IN PRESENT CONDITIONS

Water transport, especially maritime transport, plays an important role in the transportation system of many countries, as it is the cheapest, most convenient, environmentally friendly and energy-efficient type of transportation compared to road and railway transport. Inland waterway transport is an important link in the logistics chain of multimodal transportation, that will allow cargo to be transported in the most cost-effective way without significant environmental pollution. Ukraine is an important transportation hub connecting Europe, Asia and the Middle East. The Danube River, which is used for most international transportation, is a link between Ukraine and many European countries. Therefore, the development of river transport and an active shipping policy will contribute to the growth of transportation volumes through Ukraine.

The article deals with the Inland Waterway Transport Development Strategy for 2021-2031 and the action plan for its implementation. The article presents the volume of cargo traffic in the seaports of Odesa region, in particular the Danube ports of Reni, Izmail and Ust-Dunaisk, in the context of the current situation in the country. It is defined that due to dredging in 2023 (from 4 m to 6.5 m), the Danube River has become the main alternative to “deep water”. It has been found that the process of siltation of the canals is not an only obstacle to the efficient operation of waterways. For example, the effects of global warming due to fluctuations in water levels and droughts that lead to the shallowing of the Danube, affect the draft of ships and, as a result, the economic efficiency and safety of navigation along the entire river. Concerning climate change, there are several options for addressing these problems: smaller flat-bottomed vessels may have a possible advantage on the river, although their use is economically unprofitable; planning to use the vessel only in seasons with sufficient water availability.

Key words: *river transport, maritime transport, efficiency, cargo turnover, inland waterways, Strategy.*

УДК 621.341
DOI <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2024.4/46>

Бойко С.М.

Національний університет «Запорізька політехніка»

Котов О.Б.

Національний університет «Запорізька політехніка»

Жуков О.А.

Вінницький національний технічний університет

Коваль А.М.

Вінницький національний технічний університет

Риков Г.Ю.

Кременчуцький національний університет імені Михайла Остроградського

Ланіна О.С.

ТОВ «ЕЙР ТАУРУС»

АКТУАЛЬНІСТЬ ТА ОСОБЛИВОСТІ ВПРОВАДЖЕННЯ ВІДНОВЛЮВАЛЬНИХ ДЖЕРЕЛ ЕЛЕКТРИЧНОЇ ЕНЕРГІЇ В УМОВАХ ЗАЛІЗНИЧНОГО ТРАНСПОРТУ

Стаття присвячена питанням розробки рекомендації щодо впровадження додаткових джерел електричної енергії в системи електропостачання рухомого складу залізничного транспорту з метою забезпечення заходів безпеки, надійності доставки вантажів та комфорту пасажирів. У статті визначено основні вимоги, що пред'являються до автономних систем електропостачання різних типів вагонів. Акцентовано увагу на те, магістральний залізничний транспорт займає провідне місце у сфері вітчизняних та світових вантажних та пасажирських перевезень та найпоширенішими системами електропостачання пасажирських вагонів в Україні є автономні або змішані, що для живлення вагонних споживачів електрична енергія виробляється безпосередньо в самому вагоні підвагонним генератором, що обертається колісною парою. У статті, зважаючи на всі зазначені аспекти, умови та чинники, запропоновано підхід щодо забезпечення безпеки функціонування електрифікованих комплексів транспортних вузлів та, особливо, магістрального залізничного транспорту. Також, у статті за результатами досліджень доведено можливість впровадження відновлювальних джерел електричної енергії в умовах рухомого складу вагонів залізничного транспорту. Тож, під час експлуатації рухомого складу вагонів в денний час, завдяки впровадженню фотоелектричних установок виробляється електрична енергія при попаданні на них сонячної інсоляції, а при впровадженні вітроустановки забезпечується вироблення електроенергії в умовах руху пасажирського вагону та під час його стоянки. Стаття присвячена питанням вдосконалення існуючих систем енергозабезпечення рухомого складу залізничних вагонів та проєктування нових енергетичних установок з метою підтримання належного рівня безпеки при функціонуванні в умовах знеструмлення основних джерел електричної енергії. Визначено, що зважаючи на перспективність розвитку залізничного транспорту на теренах України та світу, актуальним залишається питання налагодження безпечних та надійних перевезень різних типів вантажів та пасажирів залізничним транспортом. Запропоновано впроваджувати автономні джерела електричної енергії в умовах залізничного транспорту та розроблено ряд рекомендацій щодо впровадження відновлювальних джерел електричної енергії в умовах рухомого складу вагонів залізничного транспорту.

Ключові слова: залізничний транспорт, відновлювальні джерела енергії, безпека на залізничному транспорті, автономні джерела електричної енергії, транспортна система.

Постановка проблеми. Магістральний залізничний транспорт займає провідне місце у сфері вітчизняних та світових вантажних та пасажирських перевезень. Історично склалося так, що найпоширенішими системами електропостачання пасажирських вагонів в Україні є автономні або змішані. Це означає, що для живлення вагонних споживачів електрична енергія виробляється безпосередньо в самому вагоні підвагонним генератором, що обертається колісною парою. Розповсюдження цієї автономної системи електропостачання пояснюється наявністю в Україні значних ділянок неелектрифікованих залізниць та відсутністю при цьому в цих типах тепловозів можливості виробляти напругу необхідного рівня для подальшого забезпечення транспортування його у вагонні мережі електропостачання.

При цьому в обох з наведених варіантів до складу систем електропостачання входять акумуляторні батареї (АБ) що служать джерелом живлення електричних приймачів вагонів під час його стояння. У свою чергу, АБ є і споживачами електричної енергії. При цьому доповнимо, що недоліком існуючих систем електропостачання є те, що для початку живлення споживачів та заряду АБ потрібно, щоб вагон розвинув швидкість не менше 35 км/год. Даний недолік є найбільш критичним з точки зору забезпечення комфорту пасажирів, так як він означає, що під час стоянок і під час руху поїзда на низьких швидкостях вагонні електроспоживачі змушені отримувати живлення від акумуляторних батарей, при цьому потужні споживачі повинні бути відключені.

З метою вирішення вказаної проблеми, у низці наукових досліджень розглядається можливість і робляться конкретні пропозиції щодо включення в автономні мережі електропостачання пасажирських вагонів додаткових джерел електричної енергії. Такі рішення дозволяють зробити заряд АБ незалежно стану вагона – рух чи стоянка. Проте, обов'язково необхідно контролювати рівень заряду АБ [1].

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Зважаючи на результати аналізу іноземних та вітчизняних публікацій, розвиток окремих регіонів та України цілком можливий за рахунок розвитку економіки, котра нерозривно пов'язана з транспортними системами [1-3].

Між тим, ефективність транспортних перевезень безпосередньо залежить від взаємодії різних видів транспортних засобів та своєчасне постачання енергетичних ресурсів для транспортних засобів у відповідні транспортні вузли [4,

С. 114-118]. Окрім того, результати аналізу перспектив розвитку мультимодальних технологій пасажирських перевезень на регіональному рівні в аспекті «зеленої» логістики вказують на можливість впровадження сучасних альтернативних енергетичних ресурсів у транспортній галузі, у тому числі з використанням відновлювальних джерел електричної енергії [5, С. 94-99, 6, С. 115-121]. Провідними вітчизняними науковцями розглянуто варіанти впровадження відновлювальних джерел енергії в розподільних електричних мережах та їх вплив на підвищення ефективності функціонування [7, С. 33-41].

Зважаючи на те, що магістральний залізничний транспорт в своїй більшості є електрифікованим, що зважаючи на виклики сьогодення, спонукає до пошуку додаткових шляхів та можливостей щодо ефективного використання та додаткових джерел генерації електричної енергії [8-10].

Між тим, питання забезпечення безпеки функціонування електрифікованих комплексів транспортних вузлів та, особливо, магістрального залізничного транспорту залишається відкритим.

Постановка завдання. Метою статті є розробка рекомендацій щодо особливостей впровадження відновлювальних джерел електричної енергії в умовах рухомого складу вагонів залізничного транспорту.

Виклад основного матеріалу. Аналіз автономних систем електропостачання пасажирських вагонів, що використовуються на сьогоднішній день, показав ряд недоліків їх системи.

Зокрема:

1) для початку процесу заряду акумулятора потрібно розгін поїзда до швидкості щонайменше 35 км/год. Якщо швидкість не набрана, живлення навантаження продовжує здійснюватись від акумулятора;

2) велика інерційність системи, оскільки управління вихідною напругою індукторного генератора (ІГ) відбувається за рахунок регулювання струму високоінерційної ланцюга обмотки збудження (ОЗ) (рис. 1).

Водночас вимоги до автономних систем електропостачання різних типів вагонів:

– забезпечення стабільності напруги живлення при точності підтримки вихідної напруги у ширшому діапазоні зміни швидкостей поїзда для безперебійної роботи системи вентиляції та кондиціонування вагона;

– продовження ресурсу акумуляторних батарей за рахунок наявності стабільної напруги, що встановлюється у функції температури акумуля-

торних батарей, та обмеження струму заряду акумуляторних батарей;

– використання в системі нині існуючої схеми вироблення, зберігання та розподілу електроенергії: ІГ з механічною передачею до колісної пари, знижуючий трансформатор 3х380/88, що підключається на стоянці до електричної мережі, буферна схема підключення акумуляторних батарей до навантаження.

Аналіз електрообладнання, що застосовується у вітчизняних пасажирських вагонах, показав, що має місце використання останнього для освітлення салонів, купе, коридорів, туалетів; вентиляції приміщень вагона; опалення вагона і підігріву повітря, що подається в нього взимку; охолодження повітря, що подається влітку; охолодження продуктів харчування та питної води; радіомовлення та роботи пристроїв зв'язку; створення комфортних умов для перевезення пасажирів та полегшення обслуговування поїзною бригадою, а також для забезпечення роботи пристроїв сигналізації та контролю безпеки.

Пасажирські вагони з автономною системою електропостачання характеризуються тим, що мають власні джерела електричної енергії, що забезпечують живлення низьковольтних споживачів електроенергії під час руху та на стоянках.

Перевагою цієї системи є її незалежність від зовнішнього джерела живлення, що дозволяє експлуатувати вагони у будь-якому поїзді, у будь-якому напрямку та незалежно від типу поїзного локомотива.

У цій системі для низьковольтних споживачів застосовується постійний струм. Це пояснюється тим, що на вагоні встановлено АБ, яка служить резервним та аварійним джерелом живлення. Проте, слід зауважити, що в системах із приводом від осі колісної пари генератор працює зі змінною частотою обертання, пропорційною швидкості руху поїзда.

Як резервне та аварійне джерело енергії використовується АБ, яка живить основні споживачі поїзда при непрацюючому генераторі (при його несправності, на стоянці), а також при малій швидкості руху поїзда, коли генератор не розвиває необхідну потужність. Крім того, АБ сприймає піки навантаження, що виникають при одночасному включенні кількох споживачів великої потужності, пуску електричних двигунів, короткочасних перевантаження та ін.

При швидкості поїзда вище 35–40 км/год усі споживачі одержують живлення від підвагонного генератора, а АБ знаходиться в режимі заряджання

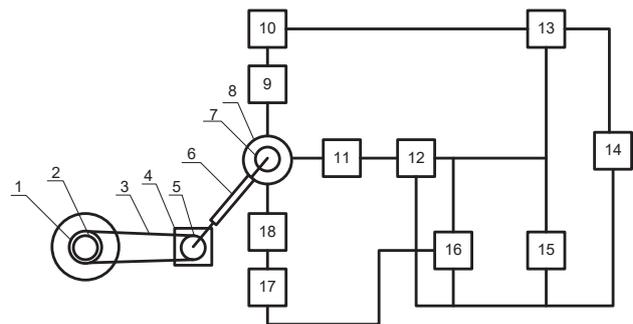


Рис. 1. Структурна схема автономної системи електропостачання пасажирського вагона з використанням підкузовного генератора:
 1 – провідний шків; 2 – вісь колісної пари;
 3 – клинові ремені; 4 – редуктор; 5 – ведений шків;
 6 – карданний вал; 7 – якоря; 8 – генератор;
 9 – додаткова обмотка генератора; 10, 12,
 17 – випрямлячі; 11 – основна обмотка генератора;
 13 – перемикаючий пристрій; 14 – акумуляторна батарея; 15 – споживачі електроенергії;
 16 – регулятор напруги; 18 – шунтуюча обмотка

від зарядного пристрою. На сучасних вагонах встановлюються генератори змінного струму, які простіші за конструкцією та більш надійні в експлуатації порівняно з генераторами постійного струму. У зв'язку з цим електроспоживачі підключені через випрямляючий міст. Під час стоянки та при низькій швидкості руху споживачі отримують живлення від акумуляторної батареї. Коли вагон знаходиться на тривалій стоянці – у відстої, споживачі отримують живлення від зовнішнього джерела живлення через блок зовнішнього джерела електроенергії, що перетворює змінну трифазну напругу зовнішньої мережі 380/220 В змінна трифазна напруга 142 В, яка випрямляється так само, як і змінна трифазний випрямляючий міст.

Для пасажирських вагонів застосовуються кислотні та лужні батареї, що складаються з певної кількості акумуляторів, з'єднаних між собою послідовно. Кислотні АБ бувають свинцеві, лужні – нікель – залізні та нікель – кадмієві.

В основі запропонованого науково-технічного рішення є розширення сфери використання відновлювальних джерел енергії, зокрема енергії збуреного турбулентного повітряного потоку що виникає на даху пасажирського вагону під час його руху та запинок, під дією атмосферних потоків повітря та сонячної інсоляції, що дозволить:

1. Використовувати генеровану потужність для власних потреб пасажирських вагонів.

2. Економити кошти на закупівлю електричної енергії.

Таким чином, вітроустановка монтується на даху пасажирського вагону, що дозволяє використовувати

незадіяну кінетичну енергію природних атмосферних потоків повітря та збуреного повітряного потоку, що виникає в результаті руху пасажирського вагону.

На рис. 2 та на рис. 3 наведено схеми розташування однієї вітроустановки на даху пасажирського вагону та розташування фотоелектричних установок малої потужності, на яких прийняті наступні позначення: 1 – вісь обертання вітроколеса, 2 – лопаті вітроколеса, 3 – генератор, 4 – опорна муфта, 5 – дах пасажирського вагону, 6 – фотоелектричні установки.

Тож, на даху пасажирського вагону встановлюється принаймні одна вітроустановка, чи вісім фотоелектричних установок малої потужності.

При чому вона монтується таким чином, щоб габарити вітроколеса задовольнялися потребам вимог експлуатації вагонів та не заважали обслуговуванню вагону та були на безпечній відстані від контактної лінії. Слід зазначити можливість встановлення гібридних систем.

Таким чином, у результаті руху вагону виникають збурення турбулентних повітряних потоків, що набігають на лопаті вітроколеса 2 та приводять його в рух. Як наслідок кінетична енергія колеса передається на вал генератора 3, який генерує електричну енергію. Згенерована електроенергія надходить безпосередньо до електромережі пасажирського вагону.

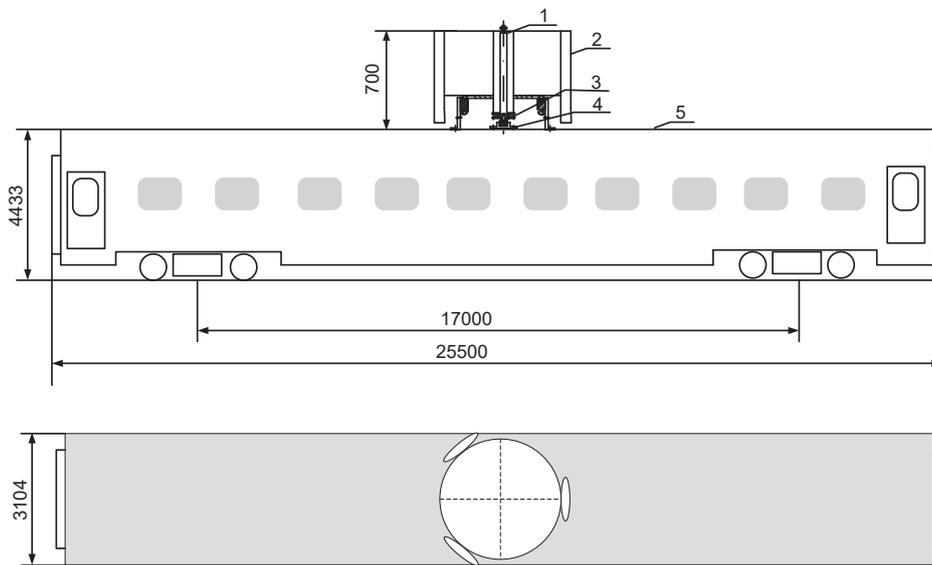


Рис. 2. Розташування вітроенергетичної установки на конструкції пасажирського залізничного вагону

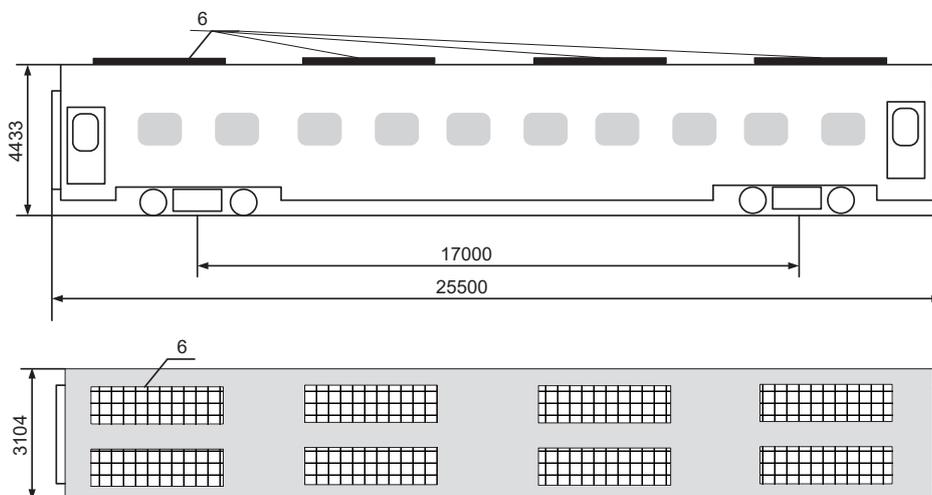


Рис. 3. Розташування фотоелектричної установки на конструкції залізничного пасажирського вагону

Завдяки такому розташуванню вітроустановки забезпечується вироблення електроенергії в умовах руху пасажирського вагону та під час його стоянки.

Під час експлуатації рухомого складу вагонів в денний час, за допомогою фотоелектричних установок виробляється електрична енергія при попаданні на них сонячної інсоляції. Завдяки такому розташуванню фотоелектричних установок, забезпечується генерація додаткового обсягу електричної енергії як під час руху вагонів так і під час стоянки.

Висновки. 1. Зважаючи на перспективність розвитку залізничного транспорту на теренах України та світу, актуальним залишається питання налагодження безпечних та надійних перевезень різних типів вантажів та пасажирів залізничним транспортом.

2. Запропоновано впроваджувати автономні джерела електричної енергії в умовах залізничного транспорту та розроблено ряд рекомендацій щодо впровадження відновлювальних джерел електричної енергії в умовах рухомого складу вагонів залізничного транспорту.

Список літератури:

1. Сторонянська І.З. Стале ендегенне зростання регіонів України в умовах децентралізації: монографія. Львів: ДУ «Інститут регіональних досліджень імені М.І. Долишнього НАН України», 2019. 501 с.
2. Державна служба статистики. URL: <http://www.ukrstat.gov.ua>
3. Analitichnyy ohlyad «LCOE vidnovlyuvanykh dzherel enerhiyi v Ukrayini» Кууiv 2018 27 s.
4. Соколова О. Є. Концептуальні засади формування мультимодальної системи перевезення вантажів. *Наукоємні технології*. 2014. № 1. С. 114–118.
5. Бойко С.М., Котов О.Б. Перспективи розвитку мультимодальних технологій пасажирських перевезень на регіональному рівні в аспекті «зеленої» логістики. *Системи та технології*, 2023. Випуск 1 (65), С. 94–99.
6. Бойко С. М., Жуков О. А., Коваль А. М., Бомбик В. С. Особливості конфігурації систем керування інверторів фотоелектричних установок. *Техніка, енергетика, транспорт АПК*. 2024. № 1. С. 115–121.
7. Стаднік М. І., Проценко Д. П., Бабій С. М. Гібридне електропостачання з використанням відновлюваних джерел енергії. *Вісник Вінницького політехнічного інституту*. 2020. № 4 С. 33–41.
8. Відновлювані джерела енергії в розподільних електричних мережах: монографія / П. Д. Лежнюк, О. А. Ковальчук, О. В. Нікіторович, В. В. Кулик. Вінниця : ВНТУ, 2014. 204 с.
9. Крихтіна Ю. О. Державна політика розвитку транспортної галузі України: теорія, методологія, практика: монографія. Харків: «Діса плюс», 2022. 336 с.
10. 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), pp. 1–15.

Boiko S.M., Kotov O.B., Zhukov O.A., Koval A.M., Rykov G.Yu., Lapina O.S. RELEVANCE AND FEATURES OF IMPLEMENTATION OF RENEWABLE SOURCES OF ELECTRICAL ENERGY IN THE CONDITIONS OF RAILWAY TRANSPORT

The article is devoted to the development of recommendations for the introduction of additional sources of electrical energy into the power supply system of rolling stock of railway transport in order to ensure safety measures, reliability of cargo delivery and passenger comfort. The article defines the basic requirements for autonomous power supply systems of various types of wagons. Attention is drawn to the fact that mainline railway transport occupies a leading place in the field of domestic and global freight and passenger transportation, and the most common power supply systems for passenger cars in Ukraine are autonomous or mixed, and to power car consumers, electrical energy is produced directly in the car itself by a rotating undercar generator by a pair of wheels. In the article, taking into account all the mentioned aspects, conditions and factors, an approach is proposed to ensure the safety of functioning of electrified complexes of transport hubs and, especially, main railway transport. Also, based on research results, the article proves the possibility of introducing renewable sources of electric energy in the conditions of rolling stock of railway transport cars. Therefore, during the operation of rolling stock during the day, due to the introduction of photovoltaic installations, electric energy is produced when solar insolation hits them, and when the wind installation is introduced, electricity generation is ensured in the conditions of movement of the passenger car and during its parking. The article is devoted to the issues of improving the existing power supply systems of rolling stock of railway cars and designing new power plants with the aim of maintaining an appropriate level of safety when operating in conditions of blackout of the main sources of electrical energy. It was determined that, taking into account the perspective of the development of rail transport in Ukraine and the world, the issue of establishing safe and reliable transportation of various types of cargo and passengers by rail remains relevant. It is proposed to implement autonomous sources of electrical energy in the conditions of railway transport, and a number of recommendations have been developed for the introduction of renewable sources of electrical energy in the conditions of rolling stock of railway transport cars.

Key words: railway transport, renewable energy sources, safety on railway transport, autonomous sources of electric energy, transport system.

Гурч Л.М.

Національний транспортний університет

Майструк В.О.

Національний транспортний університет

СЬОГОДЕННЯ ТА ПЕРСПЕКТИВИ РОЗВИТКУ ТРАНСПОРТНО-ЛОГІСТИЧНОЇ СИСТЕМИ УКРАЇНИ В ПОВОЄННИЙ ПЕРІОД

Аналіз транспортно-логістичної системи має велике значення в умовах сучасного глобалізованого світу. Ефективність транспорту та логістики впливає на міжнародну торгівлю, економічний розвиток а також на життя людей. Успішне функціонування транспортно-логістичної системи забезпечує безперервну поставку товарів якраз вчасно, ефективне використання ресурсів та зниження негативного впливу на навколишнє середовище. Це особливо актуально для країн з перехідною економікою, таких як Україна, де транспортно-логістичний сектор є важливим елементом економічної стратегії. Актуальність аналізу транспортно-логістичної системи також зумовлена впливом глобальних подій, таких як пандемія COVID-19 та військові конфлікти. Ці фактори суттєво впливають на стабільність та надійність логістичних ланцюгів постачання, створюючи додаткові виклики для бізнесу, оскільки в сучасних умовах розвитку транспортно-логістичного сектору та існування значної кількості учасників цієї галузі, забезпечення лише доставки вантажу в місце призначення вже недостатнє для задоволення потреб споживачів. Серед факторів, що впливають на формування попиту на транспортно-логістичні послуги, належить надійність та своєчасність перевезень, репутація компанії, доступність обслуговування, система тарифів та розмаїття транспортних послуг.

У статті визначені основні проблеми транспортно-логістичної системи в умовах військового стану та шляхи вирішення за допомогою модернізації залізничної інфраструктури, створення транснаціональних терміналів та впровадженню іноземного досвіду використання інтелектуальних транспортних систем у логістику компаній. Пропонуються приклади використання штучного інтелекту, обладнання та технологій для зменшення витрат і покращення якості функціонування системи за кордоном з метою подальшого впровадження в Україні в повоєнній відбудові. Тому важливо розуміти, як сучасні виклики впливають на логістичні процеси та які заходи можуть бути взяті для їх подолання, щоб підтримувати конкурентоспроможність компаній на ринку та забезпечити їхню успішність у майбутньому.

Ключові слова: транспортно-логістична система, логістичні оператори інтелектуальні транспортні системи, логістика, транспорт, війна, стратегія розвитку, штучний інтелект.

Постановка проблеми. Транспортно-логістична система України є ключовим елементом економіки, який забезпечує стабільність перевезень. Внаслідок війни інфраструктура зазнала значних пошкоджень, що викликало серйозні проблеми у функціонуванні логістичних ланцюгів. Відновлення та розвиток цієї системи у повоєнний період є важливим питанням для забезпечення економічного зростання країни.

Основною проблемою є реконструкція пошкоджених транспортних шляхів та об'єктів інфраструктури, що потребує значних фінансових ресурсів. Також необхідно розробити нові логістичні стратегії, враховуючи зміни у внутрішньому

та зовнішньому середовищі. Повоєнний період потребує перегляду ролі транспортно-логістичної системи України у глобальних ланцюгах поставок. Важливими кроками є інтеграція з міжнародними транспортними коридорами, розвиток мультимодальних перевезень та вдосконалення митних процедур.

Крім інфраструктурних викликів, слід враховувати соціально-економічні аспекти: відновлення робочих місць, підвищення кваліфікації кадрів, впровадження сучасних технологій та інновацій у логістичні процеси.

Таким чином, дослідження актуальне для виявлення викликів і перспектив розвитку тран-

спортно-логістичної системи України у повоєнний період та розробки стратегічних напрямів для її відновлення та модернізації.

Аналіз останніх досліджень і публікацій.

Аналіз останніх досліджень і публікацій з теми розвитку транспортно-логістичної системи України в повоєнний період демонструє широку зацікавленість науковців та експертів у цій сфері.

Ряд авторів наголошує на необхідності комплексного підходу до відновлення інфраструктури, враховуючи сучасні технологічні тенденції та інтеграцію з європейськими транспортними коридорами.

Зокрема, у роботах українських та міжнародних експертів відзначається значення мультимодальних перевезень, які дозволяють оптимізувати логістичні процеси та знизити витрати. Дослідники також акцентують увагу на розвитку залізничного та річкового транспорту як ефективних альтернатив автомобільним перевезенням.

Також, розглядаються питання відновлення та модернізації портової інфраструктури, яка є ключовою для забезпечення експорту та імпорту товарів. Особлива увага приділяється впровадженню інноваційних технологій.

Постановка завдання. Метою статті є дослідження впливу війни на транспортно-логістичну галузь України та виявлення можливостей та перспектив її розвитку в повоєнний період, аналіз стану транспортно-логістичної системи під час війни, визначення основних проблеми, з якими стикається галузь, а також буде запропоновано шляхи подальшого розвитку з урахуванням викликів, які виникають внаслідок війни.

Виклад основного матеріалу дослідження. Проаналізуємо рівень транспортно-логістичної системи України. Транспортна система є однією з ключових галузей економіки будь-якої держави, оскільки вона є основою для створення матеріальної бази, необхідної для забезпечення та нормального функціонування країни. Транспортна та складська логістика значно впливають на ВВП країни і сприяють створенню нових робочих місць, розвитку інфраструктури міст, підвищує конкурентоспроможність як окремих підприємств, так і всієї країни на міжнародному рівні. Для забезпечення стабільної роботи цієї галузі функціонує велика кількість транспортних

операторів, комплексних логістичних провайдерів, транспортно-експедиційних компаній, інформаційно – посередницьких організацій [1]. Логістичні провайдери, які спеціалізуються на наданні повного спектру логістичних послуг поділяються на 5 рівнів [9].

Останнім часом починають з'являтися такі логістичні оператори, як: 6PL – має за мету забезпечення екологічно безпечного управління ланцюгами постачання. Основний акцент в цій області ставиться на оптимізації використання ресурсів та стимулюванні відновлювальних процесів. Логістика сьомого рівня (7PL) є поєднанням послуг 3PL та 4PL, що включає комплексне виконання послуг, транспортні послуги та складське управління. На 8PL рівні виникне вищий комітет, який проведе аналіз практики галузі та розробить заходи для вирішення проблемних аспектів. 9PL рівень зосереджується на розв'язанні індивідуальних проблем клієнтів щодо доставки «останньої милі». Цими компаніями є Uber або Doordas. На 10PL рівні всі постачальники використовують штучний інтелект, що надає ланцюгу поставок автономію та самосвідомість [9].

Компанії, які надають повний спектр логістичних послуг, активно співпрацюють з іншими учасниками логістичного ланцюга, такими як виробники, постачальники, дистриб'ютори та роздрібні торговці, щоб забезпечити безперебійний потік товарів від постачальника до кінцевого спо-

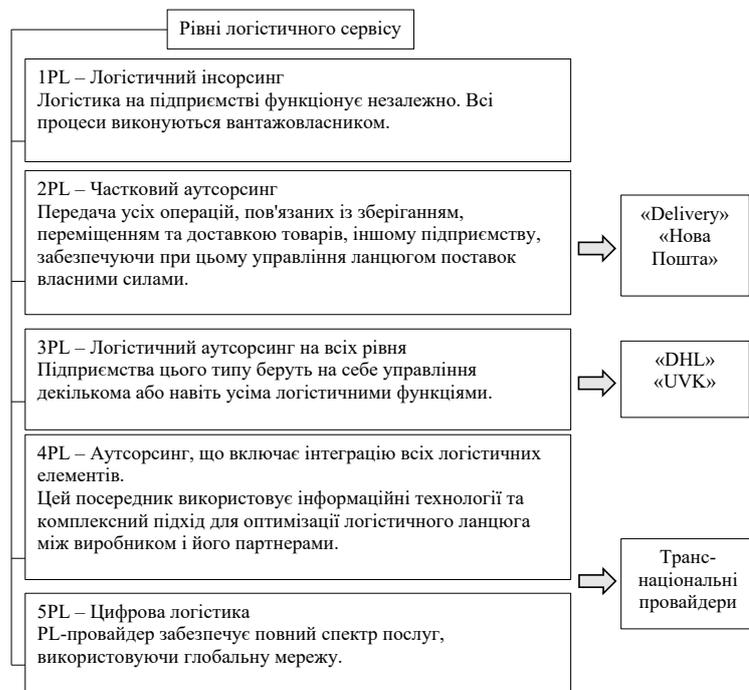


Рис. 1. Рівні логістичних операторів в Україні

Джерело: побудовано автором на основі [1, 9]

живача. Такий підхід сприяє оптимізації всього логістичного процесу і допомагає зменшити витрати та підвищити конкурентоспроможність учасників ланцюга поставок.

Надалі у дослідженні проаналізуємо плив війни на транспортно-логістичну систему. Україна, розташована на перехресті Європи та Азії, має важливе стратегічне значення як ключовий географічний вузол. Її вигідне розташування сприяє розвитку транспортних і логістичних послуг, які мають величезний потенціал для економічного зростання. Крім того, Україна має вихід до Чорного моря, що забезпечує доступ до міжнародних морських шляхів.

Бойові дії створили низку проблем для логістичної галузі України, що позначилося на компаніях по всьому світу. У довоєнний період, для міжнародної торгівлі переважно використовувалися залізничний та морський види транспорту. Наявність доступу до Чорного моря забезпечувала можливість відправки вантажів у будь-який куточок світу [13].

На початку конфлікту, вторгнення РФ, практично, призвело до зупинення експортних можливостей країни. Авіасполучення були повністю припинені, інфраструктура аеропортів та залізниць була частково пошкоджена. Складські приміщення та офіси логістичних компаній також зазнали обстрілів та пошкоджень, деякі компанії були змушені тимчасово припинити або зменшити свою активність, а деякі навіть залишити країну. Логістичні операції стали більш ускладненими через постійні перевірки та огляди на блокпостах, обмеження руху під час комендантської години та інші обставини. Крім того, існувала необхідність розробки запасних маршрутів через ризики нових атак [10].

Через поточні обставини, можливості використання морського та авіаційного транспорту значно обмежилися, компанії змушені шукати альтернативні способи доставки своїх товарів. Наразі основними засобами транспортування залишаються автомобільний, залізничний та частково річковий транспорт. Автомобільний транспорт забезпечує гнучкість у доставці товарів, дозволяючи доставляти вантажі безпосередньо до місця призначення. Залізничний транспорт, хоча і має певні обмеження щодо маршрутів, дозволяє перевозити великі обсяги вантажів на середні та довгі відстані. Річковий транспорт, де це можливо, також продовжує використовуватися, хоча його можливості є обмеженими у порівнянні з морським транспортом [13].

Війна створила значні виклики для української економіки, негативно вплинувши на бізнес [2].

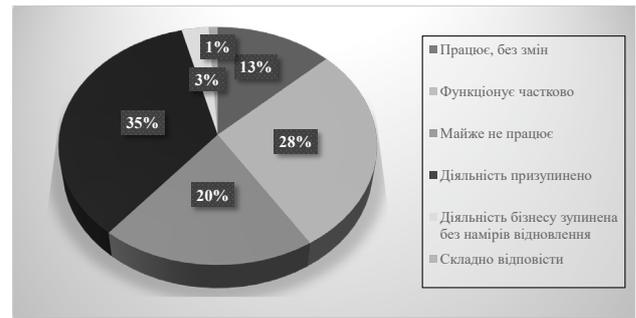


Рис. 2. Аналіз бізнесу України станом на 2022 рік

Джерело: побудовано автором на основі [2]

Незважаючи на існуючі проблеми, бізнес почав активно релокуватись на Захід України, розвивати нові шляхи для експорту за допомогою сухопутних маршрутів через європейські країни. Підприємці активно закуповують товари за кордоном, переважно в Європі та Америці, й реалізують їх в Україні. Вражаючий асортимент, висока якість та доступні ціни товарів від європейських та американських виробників роблять імпорт продукції вигідним навіть із врахуванням витрат на логістику [5].

Розглянемо перспективи розвитку логістики в повоєнний період. Транспортна мережа України має великий потенціал, але її складові розвиваються нерівномірно. Адаптуючись до умов воєнного періоду, транспортний сектор продовжує свою роботу і залишається привабливим для інвесторів. Основний напрямок розвитку національної транспортної інфраструктури спрямований на євроінтеграцію. Під час переформатування національної моделі розвитку транспортної системи, раціональною вважається створення інтелектуальної, сучасної та взаємопов'язаної транспортно-енергетичної інфраструктури, і повне використання інформаційно-комунікаційних технологій [3].

На сьогодні вже заплановані проекти, які спрямовані на підтримку економічного зростання та підвищення конкурентоспроможності країни у сфері транспорту та логістики [8].

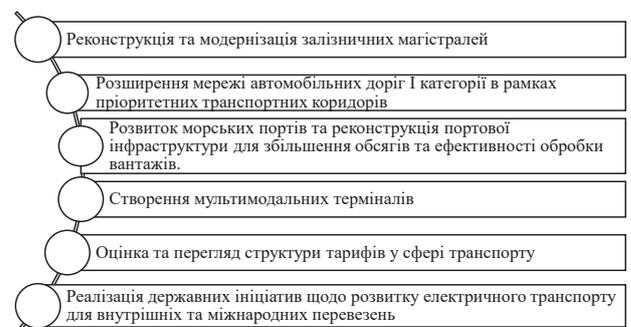


Рис. 3. Стратегічні напрямки розвитку транспортно-логістичної системи України

Джерело: [8]

Вказані напрямки розвитку відносяться до всіх аспектів транспортної інфраструктури. Проте, кожен з них має свої особливості. Досягнення успіху у цій галузі вимагає ретельного аналізу потенційних ризиків та можливих перешкод для впровадження проєктів розвитку транспортної інфраструктури.

Варто зазначити, що підвищення рівня якості транспортно-логістичного обслуговування може призвести до зростання прибутків підприємства від 5 до 15%. Вирішення цих завдань ускладнюється різноманітністю аспектів якості логістичного обслуговування, логістичних операцій і функцій тощо, а також відсутністю єдиної ідеології і розуміння позицій усіма категоріями персоналу щодо виробництва та реалізації продукту й логістичного сервісу для кінцевого споживача. Необхідний не лише розроблений стратегічний план на певний період, а й своєчасний перегляд логістичної стратегії. Це дозволить підвищити рентабельність шляхом оптимізації витрат, зменшити вплив на довколишнє середовище за рахунок скорочення відстаней або використання більш екологічно безпечних методів транспортування, скоротити час і покращити обслуговування клієнтів [4].

Розглядаючи перспективи відновлення транспортної та логістичної галузі України після війни, важливо врахувати міжнародний досвід в застосуванні передових цифрових технологій у сфері транспорту [7].

Компанії, які надають повний спектр логістичних послуг за кордоном, активно використовують сучасні технології, такі як штучний інтелект, аналітика даних, інтернет речей та інші, для оптимізації своїх процесів і підвищення ефективності надання послуг.

Застосування інтелектуальних транспортних систем сприяє вирішенню завдань, пов'язаних із забезпеченням безпеки дорожнього руху, плануванням роботи громадського транспорту, зменшення заторів на дорогах та вирішенням проблем забруднення навколишнього середовища. Проте, розвиток ІТС у транспортній інфраструктурі України ще не отримав широкого поширення. Переважно це обмежується використанням супутникової навігації та застарілих систем регулювання дорожнього руху.

Основні результати, які досягла Україна у сфері транспортної інтеграції на 2023 рік:

- Впроваджено електронний офіс перевізника
- E-ticket
- Ваговимірвальні комплекси в русі

– Підписано Угоду про Спільний авіаційний простір, яка на даний момент є асиметричною, надаючи більше переваг європейським перевізникам. Це питання стане предметом нових переговорів з ЄС після завершення війни [6].

Далі розглянемо проєкти з впровадження штучного інтелекту за кордоном:

1. Генерація пропозицій та побудова кривих попиту

Прикладом такої технології є прогнозування попиту на відправки компанією «UPS». Нейронні мережі обробляють інформацію з різних онлайн-джерел, прогнозуючи можливі зміни в попиті, враховують багато факторів і є незамінним інструментом у плануванні операцій.

2. Огляд та виявлення пошкоджень

Такі системи допомагають у виявленні дефекту на ранніх стадіях. Зіпсований товар на виробничій лінії не досягне кінцевого споживача, а ненадійна групова тара буде перенаправлена в зону проблемного вантажу, що може зберегти життя та здоров'я працівників. ШІ для візуального огляду підвищує економічну, екологічну та трудову ефективність роботи і забезпечує логістичну безпеку складу.

3. Планування логістичних поставок

Спеціально розроблені додатки, ІТ-моделі та бази даних інтегрують інформацію про актуальні ціни на певну сировину та збирають найкращі логістичні пропозиції цілодобово, без участі людської праці. У майбутньому такі технології частково замінять обов'язки менеджера, оскільки на основі аналізу даних зможуть приймати оптимальні рішення щодо логістичних поставок [11].

4. Безпілотні транспортні засоби

Прикладом такого впровадження є Париж та Стамбул. У цих містах було впроваджено безпілотні вагони метрополітену, вони здатні самостійно пересуватись без управління машиністів.

Дрони, що використовуються для доставки, можуть оптимально використовувати час, швидше досягати пунктів призначення та легко орієнтуватися в просторі, уникати перешкод. Це підвищує швидкість і надійність обслуговування при використанні штучного інтелекту. Додатковою перевагою застосування штучного інтелекту в безпілотних літальних апаратах є можливість відстеження та керування вантажем, забезпечуючи його своєчасне та безпечне доставлення [12].

5. Відстеження руху транспорту

Сьогодні в Латвії, Естонії, Іспанії, Туреччині існують мобільні додатки та онлайн-сервіси, які дозволяють пасажиром відстежувати місцезнахо-

дження потрібного їм транспорту. Завдяки цим сервісам, пасажери можуть слідкувати за своїм маршрутом і дізнаватися час прибуття автобуса або трамвая на зупинку.

Висновки. В умовах військового стану транспортно-логістична система України проявила високу стійкість та здатність до швидкої адаптації. Заблокувавши морські порти, зруйнувавши логістичну інфраструктуру, обмеживши доступ до територій, логістичні компанії країни змушені були оперативним переналаштували свої процеси, забезпечивши безперебійність поставок та збереження експортних можливостей. Розвиток інтелектуальних транспортних систем, зокрема застосування передових цифрових технологій, є перспективним напрямком для подальшого розвитку галузі. Також, для збереження конкурентоспроможності та оптимального використання фізичних активів та інфраструктури, логістичні компанії мають пріоритизувати розвиток своєї цифрової інфраструктури. Ці системи спроможні значно підвищити безпеку дорожнього руху, оптимізувати роботу на складі, зменшити затори, спланувати логістичну поставку, згенерували попит.

У відновленні після війни стратегічним пріоритетом має стати розвиток інфраструктури, зокрема у західних регіонах, що сприятиме розширенню логістичних можливостей та підтримці інтеграції з ринками Європи. Необхідно вдосконалити залізничну інфраструктуру та створити сухі порти у різних регіонах країни, щоб забезпечити ефективне зберігання та перевезення товарів.

В цілому, стратегічні напрямки розвитку української транспортно-логістичної системи повинні ґрунтуватися на ґрунтовному аналізі потенційних ризиків та можливих перешкод, враховуючи специфіку кожного виду транспорту. Впровадження інноваційних технологій, розбудова інфраструктури та інтеграція з європейськими ринками створять міцну основу для економічного зростання та підвищення конкурентоспроможності країни на міжнародній арені.

Надалі будемо продовжувати досліджувати нові можливості вдосконалення логістичних процесів та стратегій, зокрема, шляхом впровадження передових технологій, аналізу ринкових тенденцій та відгуків клієнтів, а також пошуку оптимальних рішень для підвищення ефективності та конкурентоспроможності країни на ринку транспортно-логістичних послуг.

Список літератури:

1. Буркіна Н.В., Капітонець М.В. Аналіз ринку логістики України: статистичний аспект. *Журнал Економіка і організація управління*. 2020. Випуск №3(39). С. 93-103. URL: <https://jvestnik-chemistry.donnu.edu.ua/index.php/eou/article/view/9706>
2. Діагностування стану українського бізнесу під час повномасштабної війни Росії з Україною. Аналітичний звіт: веб-сайт. URL: https://gradus.app/documents/188/BusinessInWar_Gradus_KSE_Report_30032022_ua.pdf
3. Ільченко Н.Б., Кулік А.В. Розвиток транспортно-логістичної системи в Україні. *Вчені записки Таврійського національного університету імені В. І. Вернадського. Серія : Економіка і управління*. 2019. Т. 30(69), № 5(2). С. 42-50. URL: https://www.econ.vernadskyjournals.in.ua/journals/2019/30_69_5/30_69_5_2/10.pdf
4. Криворучко О.М., Овчаренко А.Г. Сучасне розуміння поняття «якість логістичної діяльності». *Економіка транспортного комплексу*. 2018. Вип. 31. С. 150-163. DOI: 10.30977/ЕТК.2225-2304.2018.31.0.150 [Міжнародні наукометричні бази: Index Copernicus, Google Scholar].
5. Логістика під час війни: як українському бізнесу організувати транспортні потоки: веб-сайт. URL: https://www.ukrinform.ua/rubric-other_news/3566470-logistika-pid-cas-vijni-ak-ukrainskomu-biznesu-organizuvati-transportni-potoki.html
6. Логістичне управління та безпека руху на транспорті: збірник наукових праць науково-практичної конф., 10 лютого 2023 р., м. Київ / відп. ред. Н.Б. Чернецька-Білецька. – Київ: СНУ ім. В. Даля, 2023. – 81 с. URL: https://snu.edu.ua/wp-content/uploads/2023/12/lubrt_2_2023.pdf
7. Лучникова Т. П., Тарновська І. В., Воробйов Є. В. Адаптація транспортних підприємств України до умов воєнного стану. *Бізнес Інформ*. 2023. № 1. С. 116-122. URL: https://www.business-inform.net/export_pdf/business-inform-2023-1_0-pages-116_122.pdf
8. Національна транспортна стратегія України до 2030 року : веб-сайт. URL: https://publications.chamber.ua/2017/Infrastructure/UDD/National_Transport_Strategy_2030.pdf
9. Приклади логістики PL: веб-сайт. URL: <https://www.scribd.com/document/524803653/PL-logistics-examples>
10. Розвиток транспорту і логістики в Україні: веб-сайт. URL: <https://blog.youcontrol.market/rozvitok-transportu-i-loghistiki-v-ukrayini/>
11. Top15 найкращих застосувань ШІ та прикладів у логістиці у 2021 році. URL: <https://www.the-next-tech.com/artificial-intelligence/top-15-ai-applicationsand-examples-in-logistics/> (дата доступу: 01.06.2023).

12. Як впроваджують AI в транспортну систему в Україні й за кордоном: веб-сайт. URL: <https://aiconference.com.ua/uk/news/kak-vnedryayut-ai-v-transportnuyu-sistemu-v-ukraine-i-za-rubegom-97951>

13. Як війна в Україні визначить геополітичне майбутнє світу: веб-сайт. URL: https://autowrite.app/how-war-in-ukraine-will-define-the-geopolitical-future-of-the-world/#google_vignette

Gurch L.M., Mastruk V.O. CURRENT STATE AND PROSPECTS OF DEVELOPMENT OF THE TRANSPORT AND LOGISTICS SYSTEM IN UKRAINE IN THE POST-WAR PERIOD

The analysis of the transport and logistics system is of great importance in the context of the modern globalized world. The efficiency of transportation and logistics influences international trade, economic development, and people's lives. The successful functioning of the transport and logistics system ensures uninterrupted delivery of goods, efficient resource utilization, and reduction of negative environmental impact. This is particularly relevant for countries with transitional economies, such as Ukraine, where the transport and logistics sector is a vital element of the economic strategy. The relevance of analyzing the transport and logistics system is also driven by the impact of global events, such as the COVID-19 pandemic and military conflicts. These factors significantly affect the stability and reliability of logistic supply chains, creating additional challenges for businesses. In the current conditions of the development of the transport and logistics sector and the existence of a significant number of participants in this industry, providing only delivery of goods to the destination is no longer sufficient to meet consumer needs. Factors influencing the demand for transport and logistics services include the reliability and timeliness of transportation, company reputation, service availability, tariff system, and diversity of transportation services.

The article identifies the main problems of the transport and logistics system in conditions of martial law and ways to address them through the modernization of railway infrastructure, the creation of transnational terminals, and the adoption of foreign experience in the use of intelligent transportation systems in the logistics of companies. Examples of using artificial intelligence, equipment, and technologies to reduce costs and improve the quality of system operation abroad are provided with the aim of further implementation in Ukraine during the post-war reconstruction. Therefore, it is important to understand how modern challenges affect logistical processes and what measures can be taken to overcome them, in order to maintain the competitiveness of companies in the market and ensure their success in the future.

Key words: *transport and logistics system, logistic operators, intelligent transportation systems, logistics, transport, war, development strategy, artificial intelligence.*

Павловська Л.А.

Одеський національний морський університет

Коробкова О.М.

Одеський національний морський університет

Шпак Н.Г.

Одеський національний морський університет

ФОРМУВАННЯ ІНФРАСТРУКТУРНОГО КАРКАСУ СХЕМ ДОСТАВКИ ДИЗЕЛЬНОГО ПАЛИВА У ФЛЕКСІ-ТАНКАХ В УМОВАХ ВОЄННОГО СТАНУ

У статті досліджується особливості та основні інфраструктурні проблеми імпорту нафтопродуктів в Україну в період воєнного стану, зокрема проблеми імпорту дизельного палива як основної складової економічної та енергетичної безпеки країни.

На підставі статистичних даних доведена структурна географічна та транспортно-логістична трансформація вантажопотоків дизельного палива. Внаслідок відомих причин досліджуванні вантажопотоки змінили свою орієнтацію із східних на західні кордони України, а також суттєво зменшилися обсяги вантажних партій. Все це призвело до необхідності транспортування дизельного палива невеликими партіями на достатньо коротких логістичних плечах автомобільним та залізничним транспортом. Зміна складових інфраструктурного каркасу схем доставки дизельного палива призвела до дефіциту рухомого складу та, як наслідок, до необхідності пошуку більш ефективних способів транспортування.

Українськими аграріями запропонована ідея застосування спеціальних флексі-танків для транспортування дизпалива. Ця ідея прийнята за основу та отримала подальший теоретичний розвиток. Наведений стислий історичний огляд даного питання, розглянуті конструктивні особливості традиційного флексі-танку та досвід його застосування. Проведений аналіз світової практики виробництва та застосування спеціалізованих флексі-танків для транспортування небезпечних вантажів, зокрема дизельного палива. Наочно представлені основні відмінні риси багаторазових флексі-танків. Систематизовані порівняльні характеристики флексі-танків, ІВС (єврокубів), діжок, танк-контейнерів та цистерн. Розглянуті основні умови безпеки щодо транспортування в такий спосіб дизельного палива.

Запропонований алгоритм формування інфраструктурного каркасу схем доставки дизельного палива, який передбачає використання певної послідовності комплексу різноманітних методів – неформалізованих, формалізованих та слабоформалізованих.

Ключові слова: формування, інфраструктурний каркас, схема доставки, дизельне паливо у контейнерах, флексі-танки, трансформація.

Постановка проблеми. Особливості структури українського імпорту підводять до думки, що необхідно знижувати транспортні витрати при доставці паливно-енергетичних товарів, які є основою економічної та енергетичної безпеки країни. По відношенню до них необхідні рішення, спрямовані на підвищення ефективності перевезень і зовнішньоторговельних операцій шляхом застосування більш прогресивних способів перевезення. У сучасних умовах, що склалися в країні, виникла необхідність повної перебудови налагоджених раніше транспортних

маршрутів, їх ретельного обґрунтування та оптимізації.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Більшість сучасних публікацій головною мірою висвітлюють економічні та логістичні проблеми транспортування імпортованих нафтопродуктів в Україну. Так, наприклад, в роботі [1] розглядаються виклики глобального ринку нафтопродуктів та їх вплив на національну безпеку. Публікації [2-4] присвячені аналізу основних трендів на ринку світлих нафтопродуктів в Україні. В роботах [5-10] висвітлюються аспекти моделювання логістичних

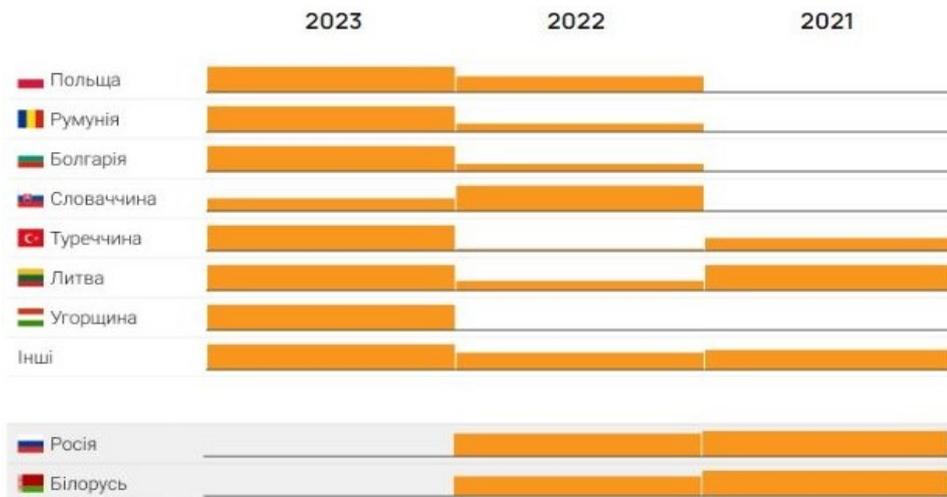


Рис. 1. Динаміка структури імпорту дизельного палива в Україну за 2021–2023 рр.

Джерело: [3]

витрат на доставку зовнішньоторговельних вантажів у сучасних умовах. Але питанням пошуку нових транспортно-технологічних рішень щодо забезпечення України нафтопродуктами, на жаль, присвячені нечисленні публікації [11].

Постановка проблеми. Метою статті є розгляд основних особливостей формування інфраструктурного каркасу схем доставки дизельного палива до України в умовах воєнного стану.

Виклад основного матеріалу дослідження. Важливу роль у чіткій організації процесу доставки вантажів відіграє формування пріоритетного варіанту інфраструктурного каркасу схем доставки вантажів, який необхідний для ретельного опрацювання процесу. Перш за все треба зазначити, що дане дослідження спирається на понятті «інфраструктурного каркасу схеми доставки вантажів», яке запропоновано авторами у попередньому дослідженні [10]. Тобто за основу прийнята дефініція «інфраструктурного каркасу схеми доставки вантажів», як графічного зображення можливих варіантів транспортно-технологічних схем доставки вантажів, що сформовані за обраним критерієм (критеріями) оптимізації.

Можна стверджувати, що конфігурація інфраструктурного каркасу схеми доставки залежить більшою мірою від географічної структури та обсягів вантажопотоків. Проаналізуємо ці фактори на прикладі імпортного вантажопотоку дизельного палива в Україну.

С початку повномасштабного вторгнення українській ринок пального зазнав такої структурної географічної та транспортно-логістичної

трансформації, якої не переживала жодна країна світу. З березня по липень 2022 року імпорт перемістився зі східного й північного на західний і південний кордон (рис. 1–3). На зміну РФ й Білорусі прийшли Польща, Румунія, Болгарія, Туреччина, Литва та їхні порти [4].



Рис. 2. Структура імпорту легких дистилатів в Україну за основними країнами-постачальниками за січень-травень 2024 р., %

Джерело: розроблено авторами на підставі [12]

Таким чином, протягом останніх років імпорт пального в Україну відбувається переважно за двома приблизно рівнозначними напрямками – польським і румунським (рис. 3). Тут мається на увазі саме місце перетину українського кордону, а не походження пального.

Очевидно, що український ринок нафтопродуктів зараз цілком орієнтований на європейський кордон. Внаслідок цього на українському ринку відбулася не лише географічна трансформація, а й транспортно-логістична.



Рис. 3. Основні канали постачань дизельного палива в Україну у 2023 р.

Джерело: [4]

Як відомо, найбільш економічним видом транспорту для транспортування нафтопродуктів великими партіями є трубопровідний транспорт, на другому місці щодо економії за ефектом масштабу – морський транспорт, далі йде залізничний. До війни великі партії дизельного палива потрапляли в Україну в основному: по трубопроводах та залізницею зі Сходу. Потім його зберігали великими обсягами на розташованих по всій країні нафтобазах, далі автотранспортом (бензовозами) розвозили по авто-заправних станціях всередині країни. Тобто автомобільний транспорт використовувався тільки для роздрібної торгівлі [2-4].

Оскільки нафтобази стали однією з головних цілей агресії, виникла одна з основних транспортно-логістичних проблем, а саме неможливість накопичення великої вантажної партії дизельного палива на нафтобазах. Отже змінилася географія поставок, змінилися розміри вантажних партій – все це суттєво вплинуло на транспортну логістику. Понад 40% імпорту почало надходити автотранспортом, тоді як до 2022 року такого виду транспортування в імпорті взагалі не було. У свою чергу частка залізниці зменшилася до 40–45% [3-4].

Ринок світлих нафтопродуктів активно трансформується. Швидкість розбудови альтернативних каналів постачання напряму залежить від правильних транспортно-технологічних рішень.

Одразу виникли проблеми з наявним рухомим складом: як на залізниці, так й на автотранспорті. Українські аграрії ще у 2002 році запропонували один з можливих варіантів вирішення цієї проблеми. Аграрії відвантажують на експорт достатньо великі партії зернових вантажів та рослинні олії у двадцятифутових контейнерах (TEU, twenty-foot equivalent unit) вантажівками та залізницею. Натомість на зворотному шляху зазвичай контейнери їдуть без вантажу – порожні. Цілком реально на зворотному шляху використовувати спеціальні багаторазові флексі-танки для перевезення дизельного палива в Україну [11].

Флексі-танки є на транспортному ринку вже давно, і хоча їх використання можна простежити ще з середини 1970-тих років, вони були дуже дорогими та позиціонувалися як багаторазові. Зпатентував флексі-танк алжирський винароб



Рис. 4. Підготовка спеціального флексі-танку для транспортування дизельного палива

Джерело: [13]

Андре Лабаронн, якій успішно впроваджував цей винахід у сільському господарстві [11].

На початку 1990-тих років їх замінили на ті, що виготовлені з термопластику, що призвело до падіння цін. Однак суттєвого розширення ринку не спостерігалось до 2001 року, коли обсяг поставання становив близько 5000 одиниць на рік. Сьогодні на ринок вийшли новіші та дешевші флексі-танки, виготовлені з кількох шарів поліетилену, і вони зробили революцію у способі транспортування рідин. Сьогодні у флексі-танках перевозиться широкий асортимент вантажів: рослинні олії, вода, віск, миючі засоби, тваринний жир, вино, друкарська фарба, фруктові концентрати, підсолоджувачі та мастильні матеріали тощо.

Також ще на початку 60-тих років минулого століття американські військові почали використовувати флексі-танки для зберігання та перевезення дизельного палива. Модель організації перевезення полягає в наступному. Флексі-танк являє собою м'який контейнер, який є можливість розмістити на різних засобах транспортування, це може бути: або металевий двадцятифутовий контейнер, або міцний кузов вантажівки, або платформа. Він може вміщати значний об'єм рідини, при цьому, у складеному вигляді зазвичай займає до 2% від обсягу, який може вміщати. Так, наприклад, у один TEU вміщується флексі-танк обсягом до 20 м³ дизпалива, а у складеному вигляді він становить лише близько 0,3 м³ і може перевозитися для використання на зворотному шляху.

Флексі-танк (flexi-tank або flexible-tank) на українському ринку представлений, як правило, імпортними виробами одноразового застосування, ціна яких коливається в межах 500 доларів. Одноразові флексі-танки зроблені з поліетилену або поліаміду та призначені для одноразового використання для перевезення безпечних наливних вантажів (рис. 5).

На відміну від традиційного флексі-танку для зберігання та транспортування небезпечних вантажів, до яких відноситься у тому числі дизпаливо, мають застосовуватися багаторазові спеціальні флексі-танки. На світовому ринку існує низка компаній, що спеціалізуються на виготовленні саме багаторазових флексі-танків. Ціна флексі-танку в цьому випадку буде вищою, проте вартість експлуатації флексі-танків зрештою буде нижчою через багаторазове використання. Відмінна риса такої продукції полягає в тому, що виготовляються флексі-танки зі спеціального полімерного матеріалу, пристосованого для багаторазового застосування та стійкого практично

до будь-яких рідин, зокрема (і це одна з головних особливостей) – це ємності та резервуари для зберігання та транспортування нафти та рідких нафтопродуктів.

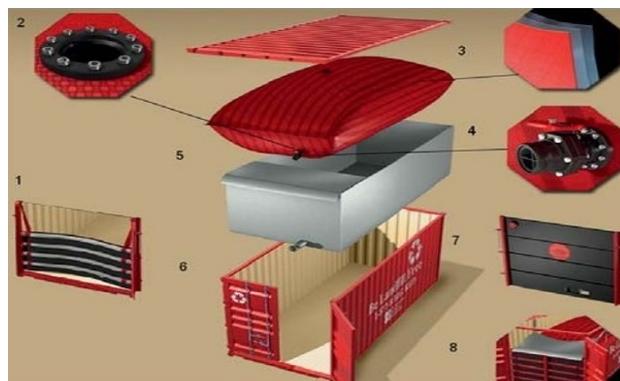


Рис. 5. Конструкція традиційного флексі-танку:
 1 – перегородка з увігнутими балками (partition with concave beams); 2 – 3-дюймовий фланець (3-inch flange); 3 – багат шаровий матеріал (multilayer material); 4 – 3-дюймовий завантажувальний клапан (3-inch loading valve); 5 – резервуар (reservoir); 6 – 20-футовий контейнер (20ft container); 7 – жорстка перегородка (rigid septum); 8 – перегородка з прямими балками (partition with straight beams)

В цілому характерні особливості спеціальних флексі-танків для небезпечних вантажів наведені на рис. 6.



Рис. 6. Відмінні особливості флексі-танків для небезпечних вантажів

Джерело: розроблено авторами

Треба зазначити, що ціна флексі-танку визначається його типом залежно від призначення продукції, що перевозиться, кількістю міцнісних і захисних шарів, розміром, і не перевищує вартість традиційної тари для відповідного обсягу. Стандартна місткість флексі-танків від 10000 до 24000 літрів, вага рідкого вантажу, як відомо, залежить від його щільності, а також від обмежень за вагою у пунктах відправлення та призначення. Проте існують й нестандартні розміри флексі-танків

від 100 л до 300000 л (рис. 7). Розміри відповідно коливаються від 300x300x300 мм для 100 л – до 2400x1500x1500 мм для 300 000 л [13].



Рис. 7. Засоби застосування нестандартних спеціалізованих флексі-танків

Джерело: [13]

Світова практика довела, що флексі-танки є більш економічним рішенням, ніж танк-контейнери, діжки, ІВС (єврокуби) або цистерни (табл. 1). Як очевидно з табл. 1, для навантаження 1 м³ флексі-танку потрібно менше часу, ніж для навантаження того ж обсягу, наприклад, цистерни, а отже потрібно менше часу для роботи перекачувального насоса та операторів, відповідно знижуються витрати на електроенергію та оплату роботи операторів. Використовуючи флексі-танки, знижуються витрати з транспортування та оренди обладнання, не потрібно платити за повернення танк-контейнеру або цистерни, відсутня необхідність у очищенні флексі-танку після вивантаження.

Треба визначити, що у флексі-танків є також й недоліки: для завантаження потрібні насоси, флексі-танки не можна застосовувати у рефрижераторних контейнерах. Але попри це, флексі-танки

є вигідною альтернативою діжкам, ІВС, танк-контейнерам, цистернам, особливо в умовах дефіциту останніх. Широке застосування цих технологій скорочує час та витрати вантажовласників.

Звісно, для таких перевезень мають бути виконані відповідні умови безпеки:

- проходження відповідного навчання водіями з отриманням свідоцтва,
- доукомплектування автомобіля засобами пожежогасіння та іншим спорядженням згідно вимог,
- періодична перевірка цілісності та ступеня зносу флексі-танків,
- використання дублюючих шарів для уникнення розливу палива за межі контейнера, кузова автомобіля, тощо.

Тим не менше, таке рішення суттєво знизить вартість перевезень, завантаженість доріг та дефіцит постачань дизпалива в Україну. Головна перевага такої технології – це можливість везти дизельне паливо прямо з точок відправки без перевантаження, тобто у мультимодальному сполученні.

Але наразі в Україні та Європейському Союзі такий тип транспортування недостатньо врегульований та, відповідно, широко не вважається дозволеним, адже дизпаливо відноситься до небезпечних вантажів (з низьким ступенем небезпеки), перевезення яких має окреме регулювання.

В той час перевезення дизпалива у флексі-танках дозволено в Австралії та країнах Південноафриканського співтовариства розвитку (SADC, Southern African Development Community) за спецдозволами для добувної промисловості і сільського господарства як в стандартних контейнерах, так і в кузовах зерновозів з подвійним (дублюючим) шаром для таких флексі-танків. Зберігання дизпалива в флексі-танках також доволі поширене в Канаді у сільськогосподарській та добувній галузях.

Таблиця 1

Порівняння витрат часу на завантаження флексі-танку, ІВС (у 1 TEU), діжок (у 1 TEU), танк-контейнеру та цистерни

| № з/п | Показник | Флексі-танк | ІВС (єврокуб) | Діжки | Танк-контейнер | Цистерна |
|-------|---|-------------|---------------|-------|----------------|----------|
| 1. | Кількість вантажних місць на стандартний ISO контейнер, одиниць | 1 | 20 | 85 | - | - |
| 2. | Місткість в 1 вантажному місці, м ³ | 24 | 1 | 0,216 | 24 | 70 |
| 3. | Загальна місткість, м ³ | 24 | 20 | 18,36 | 24 | 70 |
| 4. | Час на завантаження, хвилини | 30 | 120 | 120 | 30 | 120 |
| 5. | Час на завантаження на 1 м ³ , хвилини | 1,25 | 6,0 | 6,5 | 1,25 | 1,72 |

Джерело: розроблено авторами

Виробництвом та постачанням спеціальних флексі-танків для транспортування та зберігання дизпалива займаються декілька підприємств зі значним досвідом, що мають відповідні сертифікати на свою продукцію – FTS Flexitanks systems (ПАР), Musthane (Франція), Wiefferink (Нідерланди) та інші [13-15]. Тобто є певний досвід їх ефективного виробництва та застосування.

Для вирішення завдання формування пріоритетного варіанту інфраструктурного каркасу схем доставки дизпалива можуть застосовуватися різні методи: як неформалізовані, так й формалізовані та слабо формалізовані. У попередньому дослідженні нами запропонований алгоритм моделювання інфраструктурного каркасу схем доставки вантажів, який передбачає використання певної послідовності комплексу різноманітних методів [10]. Запропонований алгоритм передбачає послідовність таких етапів:

1. На етапі постановки задачі дослідження, тобто формування можливих варіантів інфраструктурного каркасу схем доставки вантажів пропонується застосування неформалізованих методів (наприклад, морфологічного методу або методу колективної генерації ідей), а також формалізованих методів (наприклад, методів статистичного аналізу). Саме на цьому етапі доводиться необхідність застосування спеціалізованих флексі-танків для транспортування дизпалива та формуються можливі варіанти інфраструктурного

каркасу схеми доставки імпортного дизельного палива в Україну.

2. На етапі оптимізації, тобто вибору пріоритетного варіанту інфраструктурного каркасу схем доставки вантажів доцільно застосовувати формалізовані методи, до яких в першу чергу відносять методи дослідження операцій (методи математичного програмування: лінійного, цілочислового та динамічного програмування), а також слабо формалізовані методи (наприклад, методи мережевого планування та елементи теорії графів).

3. На етапі аналізу оптимального варіанту інфраструктурного каркасу схем доставки вантажів пропонується застосування емпіричних методів, а саме, практична оцінка адекватності отриманого результату.

Запропонований алгоритм може бути застосований й у даному випадку для формування інфраструктурного каркасу схеми доставки дизельного палива.

Висновки. Сучасні умови потребують ефективних транспортно-технологічних рішень щодо обґрунтування варіантів схем доставки нафтопродуктів в Україну, зокрема дизельного палива. Доведені можливість та переваги застосування спеціалізованих багаторазових флексі-танків для транспортування дизпалива у контейнерах. Запропонований алгоритм формування інфраструктурного каркасу схем доставки дизельного палива, який передбачає використання комплексу різноманітних методів.

Список літератури:

1. Донець Д.М., Таранський І.П., Рикованова І.С. Виклики глобального ринку нафтопродуктів та їх вплив на національну безпеку: перспективи та ризики. *Академічні візії*, №2 (2024). – С.1-12
2. Кузьо Н.С., Косар Н.С. Тренди ринку світлих нафтопродуктів України та перспективи енергетичної безпеки у цій сфері. *Економіка та право*, №2 (2023). – С. 60-70 (DOI <https://doi.org/10.15407/econlaw.2023.02.060>)
3. Куюн Сергій. Чи буде Україна з пальним взимку? URL: https://enkorr.ua/ru/publications/chi_bude_ukrana_z_palnim_uzimku/255793 (дата звернення 26.07.2024)
4. Куюн Сергій. Паливний ринок: що і чому змінилося? URL: <https://zn.ua/ukr/energetics/palivnij-rinok-shcho-i-chomu-zminilosja.html> (дата звернення 26.07.2024)
5. Колотвін Р.Ю., Харчук О.Г. Сучасні підходи до вирішення логістичних проблем імпорту палива в Україні в період воєнного часу. *Зб. наук. праць науково-практичної конференції «Логістика та транспорт»*, м. Дніпро, 6-7 жовтня 2023 р. – С.31-34
6. Коробкова О.М., Павловська Л.А., Шпак Н.Г. Моделювання логістичних витрат в ланцюгах поставок зовнішньоторговельних вантажів. *Розвиток транспорту: Зб. наук. праць ОНМУ*, № 2(17) (2023). – С.133-142 (DOI <https://doi.org/10.33082/td.2023.2-17.11>)
7. Korobkova O., Pavlovska L., Shpak N. Improvement of the interaction algorithm of participants during customs and logistics service of cargo. *Зб. наук. праць УкрДУЗТ*, вип. 203 (2023) – С.88-95
8. Коробкова О.М. Логістична діяльність підприємств в умовах воєнного стану. *Actual problems of modern science*. 2023. №4. – С.457-459
9. Olga Gonchar, Anatoliy Kholodenko, Nataliia Shpak "Optimization of Specific Custom Tariffs in the International Economic System" 13th International Conference on Advanced Computer Information Technologies, ACIT 2023, Wrocław, Poland, September 21-23, 2023. IEEE 2023, ISBN 979-8-3503-1167-9 (DOI: 10.1109/ACIT58437.2023.10275368) (індексація в SCOPUS)

10. Павловська Л.А., Кириллова О.В., Коробкова О.М., Шпак Н.Г. Особливості моделювання інфраструктурного каркасу схем доставки вантажів у сучасних умовах. *Вчені записки Таврійського національного університету ім. В.І. Вернадського*, серія: технічні науки, Том 34 (73) № 2 (2023). – С.172-179 (DOI <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2023.2.2/29>)
11. Перевозка дизтоплива во флекси-танках: за и против. URL: <https://usm.media/perevozka-diztopliva-vo-fleksitankah-za-i-protiv/> (дата звернення 26.07.2024)
12. Державна служба статистики України. URL: <https://www.ukrstat.gov.ua/> (дата звернення 28.07.2024)
13. Fuel Bladder Tanks In Africa URL: <https://flexitanksystems.co.za/fuel-bladder-tanks/> (дата звернення 01.08.2024)
14. Офіційний сайт компанії Musthane. URL: <https://www.musthane.com/our-solutions/fuel-bladder/fuel-bladders/> (дата звернення 01.08.2024)
15. Офіційний сайт компанії Wiefferink. URL: <https://wiefferink.nl/en/flexitank-engels/> (дата звернення 01.08.2024)

Pavlovska L.A., Korobkova O.M., Shpak N.G. FORMATION OF THE INFRASTRUCTURE FRAMEWORK OF THE DIESEL FUEL DELIVERY SCHEME IN FLEXI-TANKS UNDER THE CONDITIONS OF MARTIAL LAW

The article examines the peculiarities and main infrastructural problems of the import of petroleum products into Ukraine during the period of martial law, in particular, the problems of importing diesel fuel as the main component of the country's economic and energy security.

On the basis of statistical data, the structural geographical and transport-logistic transformation of cargo flows of diesel fuel has been proven. As a result of known reasons, researched cargo flows changed their orientation from the eastern to the western borders of Ukraine, and the volumes of cargo lots also decreased significantly. All this has led to the need to transport diesel fuel in small consignments on fairly short logistical shoulders by road and rail transport. The change in the components of the infrastructural framework of diesel fuel delivery schemes led to a shortage of vehicles and, as a result, to the need to find more efficient methods of transportation.

Ukrainian farmers proposed the idea of using special flexi-tanks for diesel fuel transportation. This idea was taken as a basis and received further theoretical development. A brief historical overview of this issue is presented, the design features of the traditional flexi-tank and the experience of its use are considered. An analysis of the global practice of production and use of specialized flexi-tanks for the transportation of dangerous goods, in particular diesel fuel, was carried out. The main distinguishing features of reusable flexi-tanks are clearly presented. There were systematized comparative characteristics of flexi-tanks, IBC, tubs, tank-containers and tanks. The main safety conditions for the transportation of diesel fuel in this way are considered.

The proposed algorithm for forming the infrastructural framework of diesel fuel delivery schemes, which involves the use of a certain sequence of a complex of various methods – informal, formalized and weakly formalized.

Key words: *formation, infrastructure framework, delivery scheme, diesel fuel in containers, flexi-tank, transformation.*

УДК 656.23.03

DOI <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2024.4/49>**Турпак С.М.**

Національний університет «Запорізька політехніка»

Острогляд О.О.

Національний університет «Запорізька політехніка»

Васильєва Л.О.

Національний університет «Запорізька політехніка»

Харченко Т.В.

Національний університет «Запорізька політехніка»

Третяк В.І.

Національний університет «Запорізька політехніка»

ЕКОНОМІЧНИЙ АНАЛІЗ ДОСТАВКИ ВАПНЯКУ РІЗНИМИ ТИПАМИ ЗАЛІЗНИЧНОГО РУХОМОГО СКЛАДУ

Україна є одним із провідних європейських виробників вапняку та здійснює значні обсяги експорту цього стратегічного продукту. В умовах військового вторгнення в Україну підприємства, що займаються видобутком та переробкою сировини, стикаються з серйозними викликами, зокрема, в сфері постачання. Основними споживачами вапнякової галузі є металургійні підприємства. Після порушення сталих шляхів доставки вантажів внаслідок воєнних дій металургійні підприємства змушені реагувати на коливання ринку постачання сировини та збуту виробленої продукції враховуючи логістичні процеси постачання та реалізації.

В статті досліджуються питання вибору найбільш ефективних логістичних шляхів постачання вапняку для флюсування, зокрема, у контексті зміни географії постачань та використання різних типів вагонів. Особливістю перевезень вапняку є можливість використання як піввагонів так і хоперів. Кожен з них має певні недоліки та переваги.

На прикладі металургійного комбінату Запоріжсталь проведено аналіз напрямків перевезення вапняку у довоєнний період та на початку військового вторгнення з метою визначення географії можливих постачань у майбутньому, у тому числі з урахуванням післявоєнного відновлення країни та повернення підприємства до найбільш близьких та якісних джерел сировини для металургійного виробництва.

Проаналізовано тарифні ставки для визначеного діапазону відстаней та оцінено різницю тарифів з урахуванням коефіцієнту до тарифу на перевезення вапняку для флюсування. Також проведено аналіз динаміки орендної вартості використання піввагонів та хоперів за останні п'ять років. Визначено залежність орієнтовної різниці витрат при використанні піввагонів замість хоперів при доставці вапняку для флюсування.

Різниця у вартості перевезень піввагонами та хоперами суттєво варіюється залежно від відстані транспортування й тарифів. Використання як піввагонів, так і хоперів, залежно від конкретних умов, дозволить оптимізувати транспортні витрати та забезпечити безперебійне постачання сировини. У післявоєнний період відновлення країни врахування географічних та економічних факторів буде ключовим для ефективного відновлення виробництва та постачання сировини.

Ключові слова: транспортні тарифи, рухомий склад, вапняк, металургійне підприємство, орендна вартість.

Постановка проблеми. В умовах військового вторгнення в Україну підприємства, що займаються видобутком та переробкою сировини, стикаються з серйозними викликами, зокрема, в сфері постачання. Один з яскравих прикладів цього є металургійний комбінат «Запоріжсталь», який зазнає значних змін у географії постачань

вапняку. Крім того, вихід на реальні ринкові умови використання вагонів додають актуальності вирішення задачі зменшення економічних витрат на доставку вантажів в найскладніших умовах сучасності.

Вибір найбільш ефективного рухомого складу для перевезення сировини для металургійного

виробництва [1] є одним з ключових завдань, що впливає на її кінцеву вартість. Питання зменшення загальних логістичних витрат на доставку вантажів є дуже важливим. Умови перевезення вапняку дозволяють використовувати різні типи вагонів: як універсальні (піввагони), так і спеціальні (хопери), для яких характерні свої переваги та недоліки. Тому вибір оптимального типу рухомого складу для перевезення безпосередньо впливає на загальні витрати та ефективність логістичних операцій.

Україна є одним із значних європейських виробників вапняку та здійснює значні обсяги експорту цього стратегічного продукту. Незважаючи на це, під час війни металургійні підприємства вимушені були переглянути стратегію постачання. Аналіз обсягів та напрямків перевезення у довоєнний період та після військового вторгнення дозволяє визначити нові можливості та перспективи для майбутнього. Цей аналіз охоплює не тільки поточний стан, але й перспективи післявоєнного відновлення країни та повернення до найближчих та якісних джерел сировини.

Таким чином, є актуальним питання вибору найбільш ефективних логістичних шляхів постачання вапняку для флюсування, зокрема, у контексті зміни географії постачань та використання різних типів вагонів. Основну увагу буде приділено аналізу вартості тарифних ставок та витрат на доставку сировини, що допоможе визначити найбільш економічно вигідні варіанти транспортування.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Україна має потужну конкурентоспроможну галузь промисловості з видобутку вапняку, його переробки та виробництва кінцевого продукту, який використовують багато галузей промисловості в своєму технологічному виробництві [2]. Металургійні підприємства для вапнякової галузі – це головні покупці. Саме підприємства гірничо-металургійного комплексу споживають близька двох третин обсягу виробленого вапняку (рис. 1) [3].

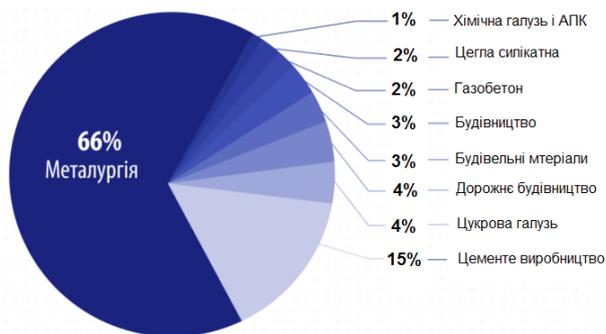


Рис. 1. Структура споживання вапняку в Україні

Ще десять років тому Україна втратила контроль над кар'єрами в Криму та на окупованих територіях частини Донецької та Луганської областей, що призвело до зменшення вітчизняного виробництва вапняково-доломітної сировини та до збільшення імпорту з країн східної Європи та ОАЕ [3]. Після початку повномасштабної війни протягом року обсяги виробництва добувної промисловості України скоротилися майже на 40 % [4], а близька 80 % підприємств цієї галузі, розташованих на сході, зовсім не працюють.

Після порушення сталих шляхів доставки вантажів внаслідок воєнних дій металургійні підприємства на сучасному етапі повинні реагувати на коливання ринку постачання сировини та збуту виробленої продукції з урахуванням логістичних процесів постачання та реалізації [5, 6]. Перед підприємства поставили нові проблеми: такі як зниження інвестування, руйнування виробничого обладнання, потреба в його відбудові тощо. Тим паче, в середині 2022 р. Укрзалізниця підвищила тарифи на перевезення майже на 70 %, а з травня 2023 р. значно виросли ставки плати за користування вагонами [4].

Постановка завдання. Метою статті є аналіз та вибір найбільш ефективних логістичних схем постачання вапняку на металургійні підприємства України в умовах повномасштабної війни. Особлива увага приділяється порівнянню економічних витрат на перевезення різними типами рухомого складу (піввагони та хопери) з урахуванням змін у географії постачань та умов сучасного ринку. Стаття спрямована на вироблення рекомендацій щодо оптимізації транспортних витрат і забезпечення безперебійного постачання сировини в найскладніших умовах сьогодення.

Виклад основного матеріалу. Особливістю перевезень вапняку є можливість використання як піввагонів так і хоперів. Кожен з цих типів рухомого складу має певні недоліки та переваги.

На основі реальних даних за певного обмеження умов, вирішується задача вибору найбільш ефективних логістичних схем [7] постачань вапняку для флюсування.

Україна являється провідним виробником вапняку у світі, здійснюючи значні обсяги експорту цієї сировини. На рис. 2 показані родовища вапняку в Україні [8].

У довоєнному 2021 році було експортовано понад мільйон тонн вапняку на суму понад 50 мільйонів доларів США. Імпортують вапняк в основному у країни східної Європи.

В Україні місця розташування родовищ вапняків є нерівномірними за територією. Вони

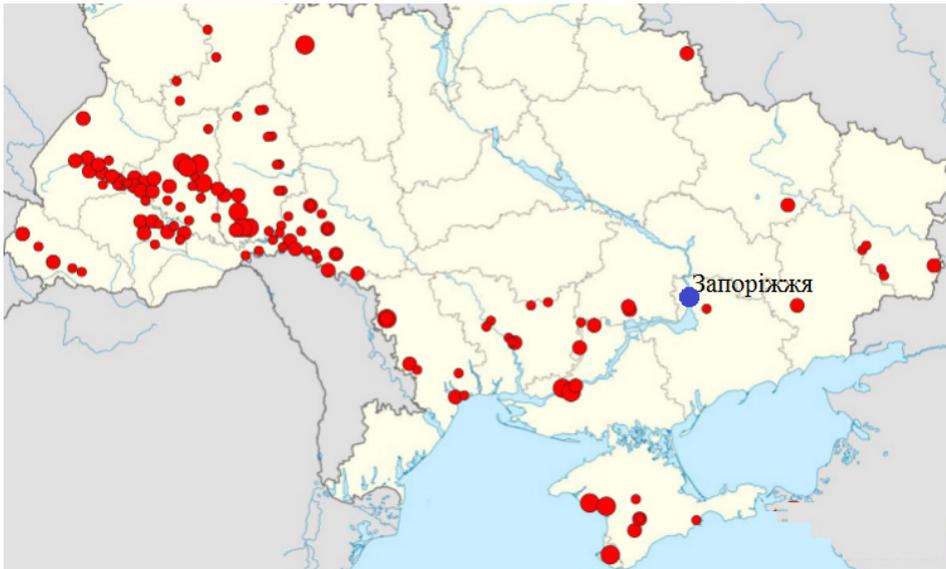


Рис. 2. Родовища вапняку в Україні

поширені в наступних зонах: Причорноморська западина та Крим; Придністров'я; Карпати; Донбас; Херсонська та Миколаївська області; Дніпропетровська область, зокрема, неподалік Кривого Рогу. Іноді вапняки залягають на глибині понад 100 м, що не дає можливості видобувати їх кар'єрним способом [9], як, наприклад, це здійснювалось у Криму.

Через військові дії в Україні доступ до найближчих якісних та дешевих з позиції видобутку вапняку родовищ став неможливим. Тому металургійні підприємства, які ще працюють попри військові дії, змушені використовувати інші джерела постачань. Одним з таких підприємств є комбінат Запоріжсталь [10].

Було проведено аналіз напрямків перевезення вапняку у довоєнний період та на початку військового вторгнення з метою визначення географії можливих постачань у майбутньому, у тому числі із врахуванням післявоєнного відновлення країни та повернення підприємства до найбільш близьких та якісних джерел сировини для металургійного виробництва. На рис. 3 показаний аналіз розподілу постачань за кількістю вагонів по тарифних відстанях перевезень у передвоєнний період.

На рис. 4 показаний аналіз розподілу постачань за кількістю вагонів по тарифних відстанях перевезень після військового вторгнення.

Як бачимо з даних рисунків, відстань постачань суттєво збільшилась навіть у перші роки після військового вторгнення у 2014 році.

Для визначеного діапазону відстаней було проведено аналіз вартості тарифних ставок (табл. 1).

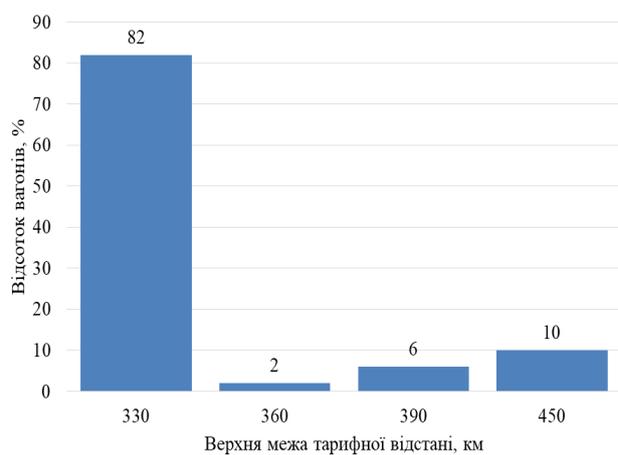


Рис. 3. Аналіз розподілу постачань за кількістю вагонів по тарифних відстанях перевезень у передвоєнний період

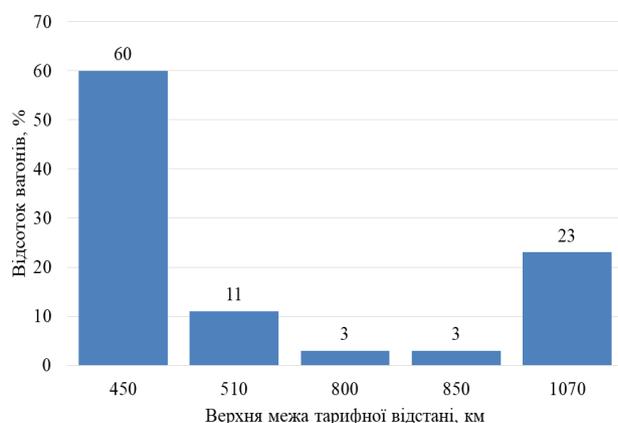


Рис. 4. Аналіз розподілу постачань за кількістю вагонів по тарифних відстанях перевезень після військового вторгнення

Були залишені лише ті значення відстаней, за якими проводився попередній аналіз та оцінено різницю тарифів [11] із урахування коефіцієнту до тарифу на перевезення для вапняку для флюсування 4,083 (табл. 2).

Окрім того, проведено аналіз динаміки орендної вартості піввагонів та хоперів [12] за останні п'ять років (рис. 5).

Було проаналізовано різницю вартостей орендної плати при використанні різних типів рухомого складу. Графік різниці орендної вартості піввагонів та хоперів наведено на рис. 6 (синій колір). Червоним кольором позначена лінія різниці середньої орендної вартості піввагонів порівняно з хоперами в періоди дії різних тарифних коефіцієнтів.

При розрахунку різниці у вартості доставки із урахуванням плати за користування вагонами враховані дані [13], за якими плата за користування піввагонами становить 1300 грн за добу, а плата за користування хоперами, за даними червня 2024 року – 650 грн за добу (тривалість обороту вагону прийнята – 3 доби). Також враховано витрати на роботу з ручного вивантаження вагонів [14] у розмірі 256 грн/вагон.

На рис. 7 показана залежність орієнтовної різниці витрат на доставку вагону при використанні піввагонів замість хоперів при доставці вапняку для флюсування.

Висновки. Повномасштабна війна в Україні суттєво вплинула на традиційні логістичні схеми постачань вапняку на металургійні підприємства,

Таблиця 1

Аналіз різниці вартості тарифних ставок

| Відстань, км | | Базова ставка, грн | | |
|--------------|------|--------------------|-------|---------|
| від | до | піввагон | хопер | різниця |
| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
| 301 | 330 | 3128 | 3332 | 204 |
| 331 | 360 | 3321 | 3542 | 221 |
| 361 | 390 | 3512 | 3750 | 238 |
| 391 | 420 | 3702 | 3957 | 255 |
| 421 | 450 | 3890 | 4161 | 271 |
| 451 | 480 | 4077 | 4365 | 288 |
| 481 | 510 | 4263 | 4567 | 304 |
| 511 | 540 | 4448 | 4768 | 320 |
| 541 | 570 | 4633 | 4968 | 335 |
| 571 | 600 | 4817 | 5168 | 351 |
| 601 | 650 | 5061 | 5434 | 373 |
| 651 | 700 | 5366 | 5765 | 399 |
| 701 | 750 | 5671 | 6096 | 425 |
| 751 | 800 | 5975 | 6426 | 451 |
| 801 | 850 | 6280 | 6757 | 477 |
| 851 | 900 | 6585 | 7088 | 503 |
| 901 | 950 | 6891 | 7420 | 529 |
| 951 | 1000 | 7197 | 7753 | 556 |
| 1001 | 1070 | 7566 | 8153 | 587 |

Таблиця 2

Орієнтовна порівняльна вартість доставки вапняку у піввагонах та хоперах

| Відстань, км | | Тариф з ПДВ, грн | | | Різниця з урахуванням плати за користування, грн |
|--------------|------|------------------|-------|---------|--|
| від | до | Піввагон | Хопер | Різниця | |
| 301 | 330 | 15326 | 16325 | 999 | -1597 |
| 331 | 360 | 16272 | 17354 | 1082 | -1514 |
| 361 | 390 | 17207 | 18374 | 1167 | -1429 |
| 421 | 450 | 19059 | 20387 | 1328 | -1268 |
| 481 | 510 | 20887 | 22376 | 1489 | -1107 |
| 751 | 800 | 29275 | 31485 | 2210 | -386 |
| 801 | 850 | 30769 | 33107 | 2338 | -258 |
| 1001 | 1070 | 37070 | 39946 | 2876 | 280 |

зокрема, для комбінату «Запоріжсталь». Підприємства змушені шукати нові джерела постачань, що призвело до збільшення відстаней транспортування та логістичних витрат.

Кожен з розглянутих видів вагонів для перевезення вапняку (піввагони й хопери) має певні переваги та недоліки. Аналіз тарифних ставок показав, що кожен тип рухомого складу має специфічні економічні характеристики, які залежать від відстані перевезення та ринкових умов. Різниця у вартості перевезень піввагонами та хоперами суттєво варіюється залежно від відстані транспортування й тарифів. В умовах військового конфлікту та додаткових логістичних витрат, оптимізація вибору транспортного засобу може значно скоротити витрати на доставку вапняку.

Для металургійних підприємств, таких як «Запоріжсталь», доцільно проводити регулярний аналіз логістичних схем та тарифних ставок для вибору найбільш економічно вигідних варіантів перевезень. Використання як піввагонів, так і хоперів, залежно від конкретних умов, дозволить оптимізувати транспортні витрати та забезпечити безперебійне постачання сировини. У післявоєнний період відновлення країни за умови повернення до традиційних джерел постачання вапняку можуть знизитись транспортні витрати та покращитись логістичні схеми. Врахування географічних та економічних факторів буде ключовим для ефективного відновлення виробництва та постачання сировини. Вихід на реальні ринкові умови використання певних типів вагонів та змінні геополітичні фактори вимагають від підприємств гнучкості та швидкої адаптації до нових викликів. Ефективне управління логістикою та оптимізація витрат є критично важливими для збереження конкурентоспроможності підприємств у складних умовах сучасності.

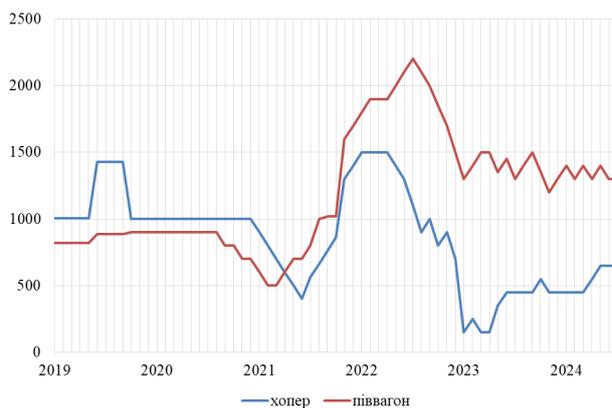


Рис. 5. Динаміка орендної вартості піввагонів та хоперів

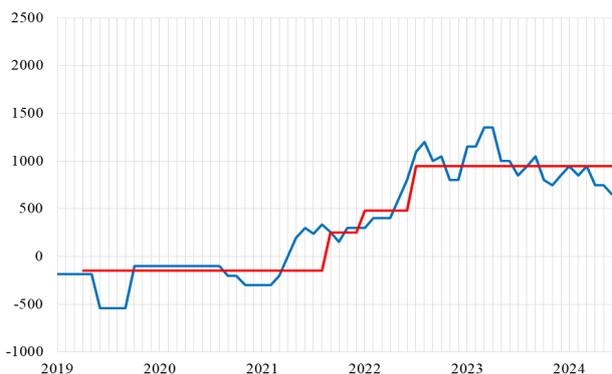


Рис. 6. Графік різниці орендної вартості піввагонів та хоперів

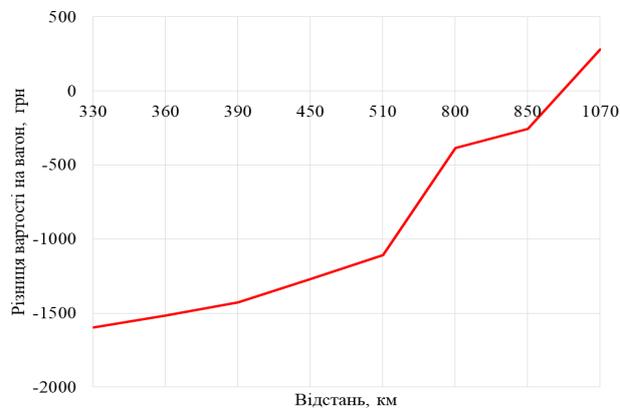


Рис. 7. Залежність орієнтовної різниці витрат на доставку вагону при використанні піввагонів замість хоперів при доставці вапняку для флюсування

Список літератури:

1. Серeda Б.П. Підвищення експлуатаційної стійкості та ефективності роботи промислового транспорту в умовах металургійного підприємства: монографія / Б.П. Серeda, С.М. Турпак, І.В. Кругляк, О.О. Острогляд, Д.Я. Муковська, Д.Б. Серeda, Д.О. Кругляк. – Кам'яньське: ДДТУ, 2021. – 272 с.
2. УАВП : *Українська Асоціація Вапняної Промисловості*. Офіційний сайт. URL : <http://limeindustry.in.ua/> (дата звернення 01.06.2024).
3. GMK CENTER. Вапнякова справа: скільки вапняку виробляють та імпортують в Україну. URL : <https://gmk.center/ua/posts/vapnyakova-sprava-skilki-vapnyaku-viroblyajut-ta-importujut-v-ukrainu/>
4. Національна асоціація добувної промисловості України. Логістика є найбільшою проблемою добувної галузі. URL : <https://neiau.com.ua/logistyka-ye-najbilshoyu-problemoju-dobuvnoyi-galuzi/>

5. Левчук К.О. Аналіз логістичних процесів металургійної галузі // *Економічний вісник Дніпровського державного технічного університету*. Економіка та управління національним господарством. № 1(8) (2024). С. 33-42. URL : <http://econvisnyk.dstu.dp.ua/issue/view/18107>
6. Гринів Н. Т., Равліковська А. А. Перебудова логістики в умовах воєнного стану в Україні // *Академічні візії*. № 13, 2022. С. 24-35. URL : <https://academy-vision.org/index.php/av/article/view/84>
7. Турпак С. М. Логістичні системи управління залізничним транспортом металургійних підприємств : монографія / С. М. Турпак. – Херсон : Грін Д. С., 2015. – 264 с.
8. Вапняки. Характеристики, різновиди та поширення. *Інститут геології*. URL : <https://insgeo.com.ua/varniak/> (дата звернення 01.06.2024).
9. Тернопільський кар'єр. URL : <https://karyer.in.ua/news> (дата звернення 16.05.2024).
10. ПАТ «Запоріжсталь»: Офіційний сайт ПАТ «Запоріжсталь». URL: <https://zaporizhstal.com/> (дата звернення 05.06.2024).
11. Збірник тарифів на перевезення вантажів у межах України та пов'язані з ними послуги. *Офіційний сайт АТ «Українська залізниця»*. URL: https://www.uz.gov.ua/cargo_transportation/tariff_conditions/transportation_in_ukraine/collection_rates/(дата звернення 12.06.2024).
12. Оновлені ціни на оренду вагонів Укрзалізниці. URL: <https://tripoli.land.ua/news/obnovleny-tseny-na-arendu-vagonov-ukrzaliznytsi-cho-izmenitsya-s-1-maya> (дата звернення 15.06.2024).
13. Ставки плати за використання власних вагонів перевізника АТ «Укрзалізниця». *Офіційний сайт АТ «Українська залізниця»*. URL : https://www.uz.gov.ua/cargo_transportation/tariff_conditions/stavky/stavky23/ (дата звернення 12.06.2024).
14. Правила обслуговування залізничних під'їзних колій : Наказ Міністерства транспорту України від 21.11.2000 № 644, поточна редакція. *Офіційний сайт Верховної Ради України*. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0875-00#Text> (дата звернення 15.06.2024).

Turpak S.M., Ostrohiad O.O., Vasylieva L.O., Kharchenko T.V., Tretyak V.I.
ECONOMIC ANALYSIS OF LIMESTONE DELIVERY BY DIFFERENT TYPES OF RAILWAY ROLLING STOCK

Ukraine is one of the leading European producers of limestone and carries out significant volumes of exports of this strategic product. In the context of the military invasion of Ukraine, enterprises engaged in the extraction and processing of raw materials face serious challenges, in particular, in the field of supply. The main consumers of the limestone industry are metallurgical enterprises. After the violation of the established routes of cargo delivery as a result of military operations, metallurgical enterprises are forced to respond to fluctuations in the market for the supply of raw materials and sales of manufactured products, taking into account the logistics processes of supply and sale.

The article examines the choice of the most efficient logistics routes for limestone supply for fluxing, in particular, in the context of changing the geography of supplies and the use of various types of wagons. A special feature of limestone transportation is the possibility of using both gondola cars and hoppers. Each of them has certain disadvantages and advantages.

On the example of Zaporizhstal iron and steel works, the analysis of the directions of limestone transportation in the pre-war period and at the beginning of the military invasion was carried out in order to determine the geography of possible supplies in the future, including taking into account the post-war restoration of the country and the return of the enterprise to the closest and highest-quality sources of raw materials for metallurgical production.

Tariff rates for a certain range of distances are analyzed and the difference in tariffs is estimated taking into account the coefficient to the tariff for transportation of limestone for fluxing. The analysis of the dynamics of the rental cost of using gondolas and hoppers over the past five years is also carried out. The dependence of the approximate cost difference when using gondola cars instead of hoppers when delivering limestone for fluxing is determined.

The difference in the cost of transportation by gondola cars and hoppers varies significantly depending on the distance of transportation and tariffs. The use of both gondola cars and hoppers, depending on specific conditions, will optimize transportation costs and ensure uninterrupted supply of raw materials. In the post-war period of the country's reconstruction, taking into consideration geographical and economic factors will be key to effectively restoring the production and supply of raw materials.

Key words: transportation rates, rolling stock, limestone, metallurgical enterprise, rental price.

УДК 629.463.001.63
DOI <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2024.4/50>

Фомін О.В.

Державний університет інфраструктури та технологій

Прокопенко П.М.

Філія «Науково-дослідний та конструкторсько-технологічний інститут залізничного транспорту»
АТ «Укрзалізниця»

Фоміна А.М.

Східноукраїнський національний університет імені Володимира Даля

Гулько Є.В.

Державний університет інфраструктури та технологій

ДОСЛІДЖЕННЯ МІЦНОСТІ ВАГОНА МОДЕЛІ 918 ТА МОЖЛИВОСТІ ПЕРЕОБЛАДНАННЯ (З ВПРОВАДЖЕННЯМ КОМПОЗИТИВ) ДЛЯ ПЕРЕВЕЗЕННЯ НАСИПНИХ ВАНТАЖІВ

В статті висвітлено результати проведеного аналізу напружено-деформованого стану кузова вагону моделі 918 при (не типових) навантаженнях сипучим вантажем.

З метою забезпечення безперервності залізничних перевезень в сучасних складних умовах, пропонується за допомогою науково-прикладних підходів опрацювати можливість використання існуючих моделей вагонів для не типових, для них, видів перевезень. А саме розглянути можливість застосування рефрижераторних вагонів для перевезення насипних вантажів. Для проведення таких досліджень застосований системний підхід. Який включав: визначення дослідження особливостей впливу насипних вантажів на конструкції рухомого складу; аналіз конструкторської та технологічної документації для створення просторової 3-Д моделі вагону, що досліджується; створення за допомогою сучасного програмного комплексу розрахункової моделі; перевірка адекватності розробленої моделі та точності отриманих за її допомогою даних; прикладання не типових (відповідних дії сипучих вантажів) розрахункових навантажень; отримання та аналіз картин напружено-деформованих станів методом скінчених елементів.

Отримані результати аналізу напружено-деформованого стану кузова вагону моделі 918 при навантаженнях сипучим вантажем дозволили оцінити потенційні можливості таких перевезень. Також даний проведений аналіз дає можливість визначити можливість виконання окремих елементів кузова вагона з композитних матеріалів, що в свою чергу покращить показники динаміки, міцності та довговічності такої конструкції.

Такі результати доцільно використовувати при проведенні науково-дослідних та дослідно-конструкторських робіт з удосконалення (модернізації) існуючих секцій рефрижераторних вагонів для забезпечення можливості перевезення в них насипних вантажів. Що, в свою чергу, дозволить підвищити ефективність функціонування вітчизняного парку вантажних вагонів.

Ключові слова: механічна інженерія, машинобудування, вантажні вагони, міцнісні розрахунки, композитні матеріали, міцність.

Постановка проблеми. Сучасні умови функціонування рухомого складу залізниць України є дуже складними. Сказане обґрунтовується необхідністю забезпечення потреб в залізничних вантажних перевезеннях існуючими зразками парку вагонів. Що вимагає їх застосування в не типових (не для перевезення визначених технічними умовами вантажів) умовах експлуатації. Зокрема виникає необхідність застосування секцій рефрижераторних вагонів для перевезення різного роду насипних вантажів.

Аналіз останніх досліджень і публікацій.

В роботі [1] автори описують проблематику появи дефектів у вигляді тріщин на вертикальному листі хребтової балки вагонів самоскидів, ремонт яких не передбачено документацією на поточний ремонт. В науковій публікації приведено результати аналізу несправностей вагонів самоскидів, результати контрольних випробувань та дослідження міцності з метою підтвердження теорії виникнення тріщин на хребтовій балці розрахун-

ково-експериментальним методом в програмному пакеті SolidWorks Simulation.

Автори в публікації [2] автори розглядають питання спрямоване на розробку сучасної методики оцінки втомної довговічності нових залізничних вантажних вагонів. З метою оцінки втомної довговічності автори пропонують проводити прискорені стендові випробування з імітацією умов реальної експлуатації вантажних вагонів. Проте в роботі неопиране питання оцінки втомної довговічності розрахунково-експериментальними методами модернізованих кузовів вантажних вагонів. В дослідженнях [3] та [4] авторські колективи запропонували підходи та методи щодо можливості розрахунків машинобудівних конструкцій на не типові навантаження. При цьому були отримані відповідні математичні моделі, графічні та аналітичні залежності. У роботі [5] проведено визначення динамічного навантаження несучих конструкцій основних типів вантажних вагонів з фактичними розмірами в основних умовах експлуатації. Також в роботі враховано два випадки навантаження несучих конструкцій вагонів – у вертикальній та поздовжній площинах. Результати роботи дають змогу розробити концептуальні основи відновлення ефективного функціонування застарілих вантажних вагонів.

Вантажні вагони в основному складаються зі зварних сталевих конструкцій, що піддаються змінним у часі навантаженням. Тому в роботі [6] авторами запропоновано декілька технічних кодів для оцінки втоми несучих конструкцій. Також у даній статті проведено порівняння досліджуваних кодів з оцінки втоми несучих конструкцій вантажного вагона. Отримані результати дають повний огляд впливу вибору конкретного технічного коду для оцінки та прогнозування втомної довговічності.

Наукові публікації [7, 8] присвячені розгляду особливостей впливу вантажів на різні типи конструкцій. При цьому більша увага приділена наливним вантажам а не насипним. В дослідження [9, 10] були представлені результати науково-дослідних робіт з впливу не типових навантажень на конструкції вантажних вагонів. При цьому розглядалися навантаження які виникають при транспортуванні вагонних конструкцій на поромках.

Стаття [11] присвячена діагностиці технічного стану несівних модулів транспорту. При цьому основна увага були приділена рушійним силам та рушійним моментам. В дослідженні [12] представлені результати рішення важливих науково-практичних питань для конструкцій напіввагонів.

Саме такі конструкції приймають основну участь в перевезеннях насипних вантажів. Однак на сьогодні парк таких вагонів не зовсім задовольняє потреби у сезонних перевезеннях. До того ж парк напіввагонів характеризується великою зношеністю та застарілістю.

Результати виконаного аналізу різного роду інформаційних джерел засвідчили, що питанням розгляду можливості перевезення сипучих вантажів в секціях рефрижераторних вагонів не приділено достатню увагу.

Постановка завдання. Метою статті є висвітлення результатів проведеного аналізу напружено-деформованого стану кузова вагону тип-918 при (не типових) навантаженнях сипучим вантажем. Такий аналіз проводився з метою дослідження можливості перевезення різних видів насипних вантажів (наприклад різного роду сировини, сільськогосподарської продукції, будівельних матеріалів, на інших) у існуючій конструкції секції рефрижераторного вагону та використання в його конструкції композитних матеріалів.

Виклад основного матеріалу. Рефрижераторний вагон представляє собою універсальний критий вагон, призначений для перевезення швидкопсувних вантажів, більшість з яких складають продукти харчування.

Для проведення оцінки напружено-деформованого стану (міцнісного розрахунку за Нормами) несучих конструкцій вагону моделі 918 методом кінцевих елементів у комп'ютерному пакеті SolidWorks побудовано відповідну 3D модель.

3D-модель кузова вагона моделі 918 побудована згідно конструкторської документації заводу-виробника і складається із більш ніж 550 деталей (рис. 1).

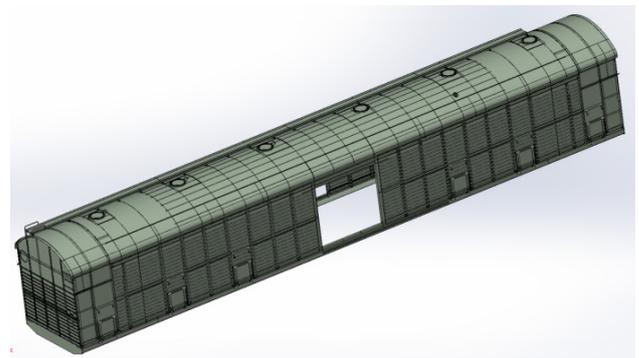


Рис. 1. 3D-модель кузова вагона

Для проведення розрахунків на міцність розроблено кінцево-елементну модель кузова вагона з розмірами кінцевих елементів 5 мм і 50 мм

Схему навантаження кузова вагона моделі 918 розроблено згідно [12]. Розрахунки виконувалися

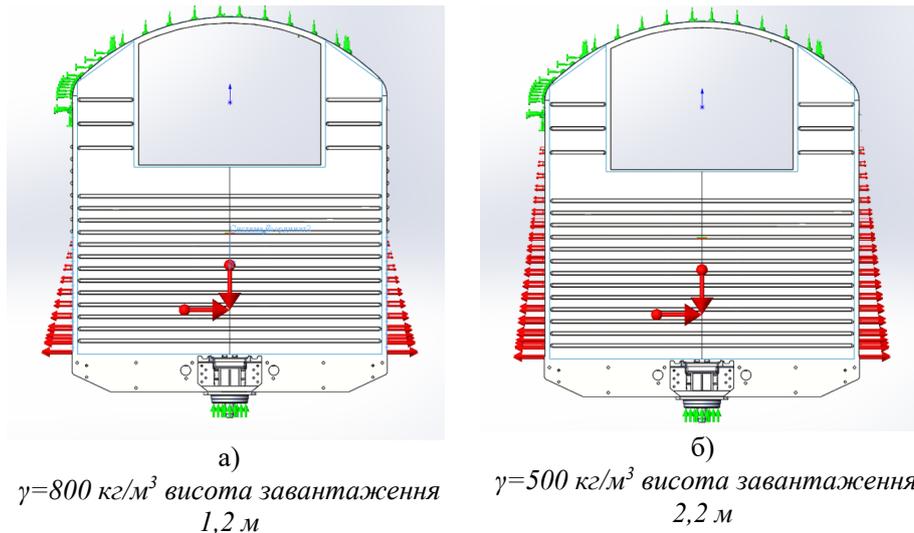


Рис. 2. Розрахункова схема для III режиму з сипучим вантажем

для найбільш невідповідного можливого поєднання одночасно діючих нормативних сил у відповідності зі встановленими розрахунковими режимами Перший – щоб врахувати максимальне навантаження на торцеву стінку та Третій – максимальне навантаження на бічну стінку.

Так як вагон буде використовуватись для перевезення сипучих вантажів, було прийнято рішення розраховувати бічні стінки на розпираючі навантаження.

Тиск розпору насипного вантажу на одиницю площі стінок кузова P_a Н/м² визначається за формулою:

$$P_a = (1 + k_{\text{дн}}) \cdot \rho \cdot g \cdot y \cdot \text{tg} \left(\frac{\pi}{4} - \frac{\varphi}{2} \right), \quad (1)$$

де $k_{\text{дн}}$ – коефіцієнт вертикальної динаміки, приймається при розрахунку за I режимом $k_{\text{дн}} = 0,1$ а за третім режимом $k_{\text{дн}} = 0,353$; γ – насипна щільність вантажу (щільність вантажу перевезення) визначається за номінальною вантажопідйомністю (50 т) і об'ємом кузова в загальному випадку визначено (112 м³) і складає:

- а) $\gamma = 800$ кг/м³ висота завантаження 1,2 м;
- б) $\gamma = 500$ кг/м³ висота завантаження 2,2 м;

При мінімальній щільності висота завантаження складає 2.2 м і максимальна вага вантажу при цьому 39.2 т.

При максимальній щільності вантажу, найбільша висота завантаження 1,2 м, а максимальна вага вантажу – 49 т.

Розпір насипного вантажу по третьому режиму навантаження. Визначаємо активний (статичний) тиск на одиницю площі бокової стінки:

$$P_a = P_a = (1 + 0,353) \cdot 800 \cdot 9,81 \cdot y \cdot \text{tg} \left(\frac{3,14}{4} - \frac{0,157}{2} \right) = 9062 \cdot y \text{ Па}$$

$$P_a = P_a = (1 + 0,353) \cdot 500 \cdot 9,81 \cdot y \cdot \text{tg} \left(\frac{3,14}{4} - \frac{0,157}{2} \right) = 5664 \cdot y \text{ Па}$$

Розрахункова схема для третього режиму представлена на рисунку 2.

Допустимі напруження. При визначенні властивостей матеріалу, які потрібні для проведення розрахунків на міцність, застосовано деякі припущення. По-перше, матеріал, з якого виготовлена та чи інша деталь, вважається однорідним. Крім того, дійсні характеристики реального матеріалу, з якого виготовлені будь-яка конструкція, мають певні відхилення від характеристик, що наведені у довідниках.

Найбільш напружені зони рами кузова вагона за першим режимом представлені на рисунку 3.

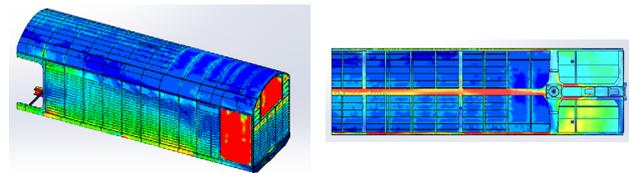


Рис. 3. Епюра розподілення напружень кузова при I режимі

Лист бічної стінки біля торцевої стінки кузова, котрий нічим не підкріплений, не витримує навантажень. Напруження в тому місці становить 800 МПа. Напруження в рамі кузова не перевищують 250 МПа.

На рисунку 4 наведено епюру еквівалентних напружень, що виникають в рамі кузова вагона від дії нормативного навантаження за третім режимом при скінчено-елементній моделі з розмірами 5 мм і 50 мм.

Також на рисунку 4 показано балки на бічних стінках, напруження в яких 320 МПа, що перевищує допустимі значення. Допустимі напруження

становлять 155 МПа, тому стійки бічних стінок, обшивки, не витримує даних навантажень.

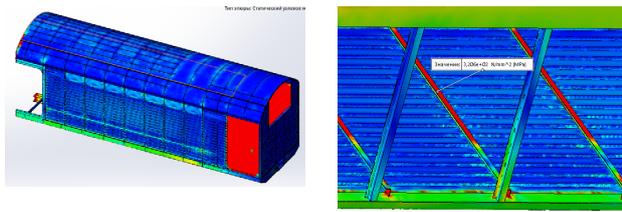


Рис. 4. Епіюра розподілення напружень III режим

На рисунку 5 показано еквівалентні напруження при розрахунку бічних стінок на розпираючі навантаження.

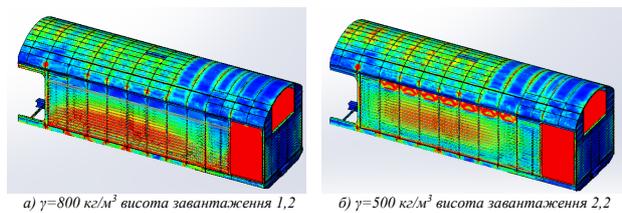


Рис. 5. Епіюра розподілення напружень за третім режимом

В результаті розрахунку навантаження на бічну стінку є надмірними. Обшивка, підкріплена тільки стійками, не може утримати навантаження від насипного вантажу. Необхідно посилити бокові стінки створюючи решітчастий каркас.

Висновки.

1. Розроблено 3-Д модель несучого модуля кузова вагону моделі 918, яка представляє собою суцільнометалеві несучі конструкції, що виконані із набору повздовжніх і поперечних елементів

жорсткості, перекритих тонкими гофрованими листами.

2. Результати аналізу епюри еквівалентних напружень, що виникають в рамі кузова вагона від дії нормативного навантаження за першим режимом засвідчили, що найбільші напружені зони рами кузова вагона знаходяться в листі бічної стінки біля торцевої стінки кузова, котрий нічим не підкріплений. При цьому напруження в тому місті становить 800 МПа, тобто значно перевищують рівень допустимих. Напруження в рамі кузова, при зазначеному розрахунковому випадку, не перевищують 250 МПа.

3. Результати аналізу епюри еквівалентних напружень, що виникають в рамі кузова вагона від дії нормативного навантаження за третім режимом засвідчили, що найбільші напружені зони рами кузова вагона знаходяться в балці на бічних стінках, і їх рівень становить 320 МПа, що перевищує допустимі значення. Допустимі напруження становлять 155 МПа, тому стійки бічних стінок, обшивки, не витримує даних навантажень.

4. Результати аналізу епюри еквівалентних напружень, які виникають при розпиранні навантаження, засвідчили, що навантаження є надмірними. Обшивка, підкріплена тільки стійками, не може утримати навантаження від насипного вантажу. Необхідно посилити бокові стінки створюючи решітчастий каркас.

Резюмуючи вищевикладені результатами дослідження, можна зробити висновок, що модернізація вагонів такого типу можлива лише за умови посилення конструкції кузова та виконання окремих його елементів з композитних матеріалів.

Список літератури:

1. Koshel O., Sapronova S., Kara S. Revealing patterns in the stressed-strained state of load-bearing structures in special rolling stock to further improve them. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2023.4 (7 (124)). Pp. 30–42. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2023.285894>
2. Li X., Fang J., Zhang Q., Zhao S., Guan X. Study on Key Technology of Railway Freight Car Body Fatigue Test. *Journal of Failure Analysis and Prevention*. 2020. 20 (1). Pp. 261–269. <https://doi.org/10.1007/s11668-020-00828-7>
3. Sokolov V., Porkuian O., Krol O., Stepanova O. Design Calculation of Automatic Rotary Motion Electrohydraulic Drive for Technological Equipment. In: *Advances in Design, Simulation and Manufacturing IV. DSMIE 2021. Lecture Notes in Mechanical Engineering*. 2021. 1. Pp. 133-142. https://doi.org/10.1007/978-3-030-77719-7_14
4. Krol O., Sokolov V. Modeling of Spindle Node Dynamics Using the Spectral Analysis Method. In: *Advances in Design, Simulation and Manufacturing III. DSMIE 2020. Lecture Notes in Mechanical Engineering*. 2020. 1. Pp. 35-44. https://doi.org/10.1007/978-3-030-50794-7_4
5. Fomin O., Lovska A. Determination of dynamic loading of bearing structures of freight wagons with actual dimensions. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2021. 2, 7 (110). <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2021.220534>
6. Vega B., Perez J. Comparative analysis of fatigue strength of a freight wagon frame. *Welding in the World*. 2023. 68. Pp. 321–332. <https://doi.org/10.1007/s40194-023-01577-5>

7. Melnyk O., Onyshchenko S., Onishchenko O., Lohinov O., Ocheretna V. Integral Approach to Vulnerability Assessment of Ship's Critical Equipment and Systems. *Transactions on Maritime Science*. 2023. 12 (1). <https://doi.org/10.7225/toms.v12.n01.002>
8. Yakovlieva A., Boichenko S. Energy Efficient Renewable Feedstock for Alternative Motor Fuels Production: Solutions for Ukraine. *Studies in Systems, Decision and Control*. 2020. 298. Pp. 247 – 259. https://doi.org/10.1007/978-3-030-48583-2_16
9. Fomin O., Lovska A., Píšťek V., Kučera P. Dynamic load computational modelling of containers placed on a flat wagon at railroad ferry transportation // *Vibroengineering Procedia*. 2019. 29. Pp. 118-123 <https://doi.org/10.21595/vp.2019.21132>
10. Fomin O., Lovska A., Radkevych V., Horban A., Skliarenko I., Gurenkova O. The dynamic loading analysis of containers placed on a flat wagon during shunting collisions// *ARP Journal of Engineering and Applied Sciences*. 2019. 14 (21). Pp. 3747-3752. http://www.arpnjournals.org/jeas/research_papers/rp_2019/jeas_1119_7989.pdf
11. Gubarevych O., Goolak S., Melkonova I., Yurchenko M. Structural diagram of the built-in diagnostic system for electric drives of vehicles. *Diagnostyka*. 2022. 23(4). 2022406. <https://doi.org/10.29354/diag/156382>
12. Okorokov A., Fomin O., Lovska A., Vernigora R., Zhuravel I., Fomin V. Research into a possibility to prolong the time of operation of universal semi-wagon bodies that have exhausted their standard resource. *Eastern-European journal of enterprise technologies*. 2018. 3/7(93). Pp. 20-26 <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2018.131309>

Fomin O.V., Prokopenko P.M., Fomina A.M., Gunko E.V. RESEARCH OF THE STRENGTH OF THE WAGON MODEL 918 AND THE POSSIBILITY OF CONVERSION (with the introduction of composites) FOR THE TRANSPORTATION OF BULK CARGO

The article highlights the results of the stress-deformation analysis of the 918 model wagon body under (non-typical) loads with bulk cargo.

In order to ensure uninterrupted railway transportation in today's complex conditions, it is proposed to use scientific and applied approaches to develop the possibility of using existing models of wagons for types of transportation that are not typical for them. Namely, to consider the possibility of using refrigerated wagons for the transportation of bulk cargo. A systematic approach is used to conduct such research. Which included: determination of the study of the specifics of the impact of bulk cargo on rolling stock structures; analysis of design and technological documentation to create a spatial 3-D model of the wagon under investigation; creation of a calculation model using a modern software complex; checking the adequacy of the developed model and the accuracy of the data obtained with its help; application of non-typical (corresponding to the action of bulk cargo) calculated loads; obtaining and analyzing pictures of stress-strain states by the finite element method.

The obtained results of the analysis of the stress-deformation state of the body of the 918 wagon under loads with bulk cargo made it possible to assess the potential possibilities of such transportation. Also, this analysis makes it possible to determine the possibility of making individual elements of the car body from composite materials, which in turn will improve the dynamics, strength and durability of such a structure.

It is expedient to use such results when carrying out research and development works on the improvement (modernization) of existing sections of refrigerated wagons to ensure the possibility of transporting bulk cargo in them. Which, in turn, will increase the efficiency of the domestic fleet of freight wagons.

Key words: *mechanical engineering, mechanical engineering, freight wagons, strength calculations, composite materials, strength.*

Фомін О.В.

Державний університет інфраструктури та технологій

Козинка О.С.

Державний університет інфраструктури та технологій

Фоміна А.М.

Східноукраїнський національний університет імені Володимира Даля

Лісничий В.С.

Державний університет інфраструктури та технологій

ЗАСТОСУВАННЯ М'ЯКИХ ПОЛІМЕРНИХ ПОКРИТТІВ ДЛЯ НЕСІВНИХ СКЛАДОВИХ РУХОМОГО СКЛАДУ

В роботі досліджено застосування м'яких полімерних покриттів для несівних складових рухомого складу. Полімери – це великі молекули, що складаються з одиниць, що повторюються, які можуть бути оброблені і перетворені на різні форми і конструкції. У полімерному машинобудуванні використовуються різні технології та матеріали, які дозволяють створювати продукти з різноманітними властивостями та функціональністю. В статті розглянуто застосування каучуку (виробництво гуми), полімерні покриття, полімерні антифрикційні покриття, переваги та недоліки полімерних покриттів та його нанесення, переваги та виклики полімерного машинобудування, а також його перспективи. У полімерному машинобудуванні використовуються різні полімерні матеріали, такі як пластмаси, гуми, композити та інші. Ці матеріали мають різні властивості, такі як міцність, гнучкість, стійкість до хімічних впливів і тепла, що робить їх ідеальними для використання в різних галузях промисловості. Роблячи огляд полімерів і пластмаси, можна сказати, що їм властива загальна наявність якісних характеристик. Обидва з'єднання експлуатуються в різних галузях людської діяльності, наприклад, при виробництві машин, в сільсько-господарських цілях, в медицині, при виготовленні літаків, в суднобудуванні тощо. Повсякденна обстановка людини не може обійтися без цих речовин. Завдяки сполукам високомолекулярного типу, можливе виробництво різних волокон, гуми і, власне, пластмаси. Розглянули власні коливальні процеси, що протікають у різних технічних пристроях, мають величезний, часто навіть вирішальний вплив на умови експлуатації цих об'єктів, їхню міцність і довговічність. При конструюванні механічного об'єкта важливо розуміти, наскільки далеко чи близько від резонансних будуть його експлуатаційні режими.

Ключові слова: корозія, полімерні покриття, каучук, антифрикційні покриття, власні коливання, рухомий склад.

Постановка проблеми. Будівництво та подальша експлуатація залізниць передбачає використання великої кількості металоконструкцій різних типів. Більшість з них знаходяться просто під відкритим небом, а значить, потребують посиленого захисту від корозії. Обробка сучасними антикорозійними засобами необхідна, зокрема, для наступних елементів: металевих частин вокзалів та інших будівель; рейок, кріплень та іншого колійного обладнання; рухомого складу – локомотивів, вагонів, платформ, цистерн; мости та інші компоненти залізничної інфраструктури.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. На промислових підприємствах ланцюгові полімери почали виготовляти на початку 20-го століття.

З моменту зародження галузі з їх виробництва шляхи утворення з'єднань розділилися на дві гілки. Перша займалася переробкою полімерів, органічної та природної форми. З їх допомогою створювалися штучні види. Процес синтезу, як правило, проходить за участю низькомолекулярного ряду з'єднань.

В вагонобудуванні та автомобільній промисловості полімерне машинобудування використовується для створення різних деталей та компонентів, таких як панелі приладів, бампери, кермові колонки та інші. Полімерні матеріали мають легкість, міцність і хорошу стійкість до корозії, що робить їх ідеальним вибором для автомобільних додатків.

Постановка завдання. Метою роботи є застосування м'яких полімерних покриттів для несівних складових рухомого складу. Для досягнення поставленої мети, поставлені та вирішені наступні завдання:

- визначення особливостей застосування каучуку (виробництво гуми) для покриттів;
- розгляд властивостей поширених полімерних покриттів;
- визначення особливостей застосування полімерних антифрикційних покриттів;
- аналіз переваг та недоліків полімерних покриттів та їх нанесення;
- визначення особливостей застосування захисного епоксидного покриття для металу;
- модальний аналіз несівної металевої деталі рухомого складу з гумовим покриттям.

Виклад основного матеріалу. Каучуки – це натуральні або синтетичні високомолекулярні матеріали (еластомери). Полімери, що володіють високими еластичними властивостями у процесі експлуатації. Каучуки можуть розтягуватися до розмірів, що багаторазово перевищують їхню початкову довжину [1, с. 246]. Каучуки еластичні та водонепроникні. Вони не проводять електричний струм, що дозволяє застосовувати їх як ізолюючі матеріали. Вони не розчиняються у воді, добре розчиняються в бензині, бензолі, ефірі та інших легких рідинах. З них отримують гуми та ебоніти.

Вони поділяються на матеріали загального та спеціального призначення. До полімерів із групи загального призначення відносяться зразки з високими міцнісними та еластичними характеристиками, так би мовити, зі стандартними властивостями та застосовуються вони стандартних умов. Матеріали ж із специфічними властивостями, мають не тільки гарну еластичність та міцність, а й стійкість, здатні працювати при дії екстремальних температур, агресивних хімічних факторів тощо [1, с. 253; 7, с. 46].

Найширше застосування, яке виявили, що натуральний, що штучний каучук – це виробництво гуми. І не тільки гуми, а гуми з певними властивостями. Одержувана з каучуку гума, включає певні добавки. Вона стійкіша до зовнішніх факторів, еластична. Гума застосовується у всіх галузях у машинобудуванні, у хімічній промисловості, важкій промисловості, сільському господарстві, у виробництві одягу та взуття, в автомобілі та авіабудуванні тощо [2, с. 257; 3, с. 438]. Її застосовують для виробництва покришок та камер для будь-якої техніки, що працює на колісному ході.

Полімерні покриття призначені для обробки металевих поверхонь з метою захисту від корозії та надання декоративного зовнішнього вигляду. Розглянемо самі поширені полімерні покриття, такі як поліестер, та полівінілденфторид (ПВДФ) [4, с. 204; 6, с. 343].

Поліестер (поліефір) найбільш популярний полімер, який використовується як покриття. Він характеризується високою стійкістю до УФ-випромінювання, відмінними антикорозійними властивостями, еластичністю (легко формується).

Полівінілденфторид (ПВДФ) застосовується для захисту металів не набагато рідше, ніж поліестер. Цей полімер складається з полівінілхлориду (80%) та акрилу (20%). Полівінілденфторид стійкий до механічного впливу і має найбільший термін служби серед усіх полімерів. ПВДФ використовується для обробки металевих поверхонь, які експлуатуються під впливом агресивного довкілля.

Особливим різновидом полімерних захисних матеріалів є антифрикційні твердозмащувальні покриття. Зовні вони схожі на фарби, проте пігмент у їхньому складі замінюють високодисперсні частинки твердих мастил: дисульфиду молібдену, графіту, політетрафторетилену та ін [5, с. 617; 9, с. 83]. Тверді мастила рівномірно розподілені в полімерному сполучному: епоксидної, титанатової, поліуретанової, акрилової, фенольної та інших смолах.

Затребуваність антифрикційних твердозмащувальних покриттів обумовлена їх відмінними робочими характеристиками: високою несучою здатністю, широким діапазоном експлуатаційних температур, протизадирними та антикорозійними властивостями [8, с. 219].

До переваг полімерів можна віднести: непроникність, відносну термостійкість, електроізоляційні властивості, стійкість до води, екологічність, високу адгезію.

Однак, поряд з позитивними сторонами полімерні покриття не позбавлені недоліків. Головний з них – висока вартість нанесення, що складається з вартості самого полімеру, допоміжних (грунтувальних) матеріалів, спеціального обладнання та ін. Ще одним мінусом полімерних покриттів є складність їхнього видалення. Вони досить стійкі до хімікатів, тому розчинником видалити полімерний шар не вийде. Зняти покриття можна лише за допомогою спеціального інструменту. Істотний недолік полімерів – неможливість їх нанесення без спеціальних інструментів, які

мають тільки промислові підприємства або вузькі фахівці. Крім того, полімерними сумішами можна покривати не всі метали, а тільки ті, які проводять електричний струм. Це з особливим способом нанесення полімерів – шляхом магнітної індукції.

Епоксидна емаль користується найбільшим попитом серед інших різновидів емалевих фарб. На високий попит на емаль, виготовлену на основі епоксидної смоли, великий вплив зробили її переваги:

- епоксидне лакофарбове покриття створює надійний захист від різних кислот, газів та лужних розчинів, залишаючись у вигляді плівки на фарбованій поверхні;

- високий рівень адгезії забезпечує надійне, рівномірне покриття робочих поверхонь з будь-яких матеріалів та щільне зчеплення з ними;

- епоксидна емаль не зазнає негативного впливу будь-яких видів розчинників та інших продуктів нафтової промисловості. Тому вона широко використовується у автомобілебудуванні;

- після фарбування епоксидною емаллю будь-яка поверхня стає захищеною від іржі, хвороботворних грибків та бактерій, а також негативного впливу води;

- епоксидну емаль у більшості випадків допускається наносити навіть в один шар. Цього цілком достатньо для всебічного захисту виробу;

- фарбування будь-яких поверхонь епоксидною емаллю дозволяє суттєво продовжити термін їхньої служби.

Розглянемо та проаналізуємо модальний аналіз несівної металевої деталі рухомого складу з гумовим покриттям. Модальний аналіз використовується для обчислення власних частот та форм коливань моделі.

Розглянемо власну частоту коливань металевої деталі на прикладі шпонки з гумовим покриттям. Створюємо 3D-модель в SolidWorks металевої шпонки з гумовим покриттям (рис. 1).

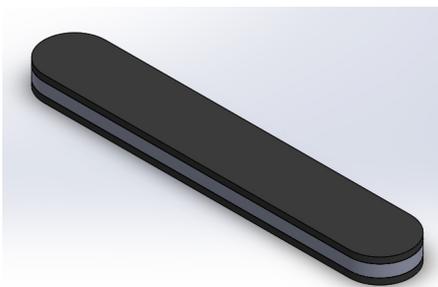


Рис. 1. Металева шпонка з гумовим покриттям

Створюємо повне закріплення знизу, шпонкової деталі з гумовим покриттям (рис. 2).

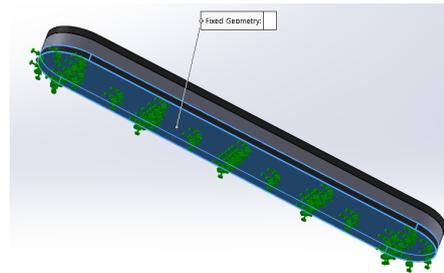


Рис. 2. Закріплення моделі

Побудуємо кінцево-елементну сітку з параметрами за замовчуванням (рис. 3).

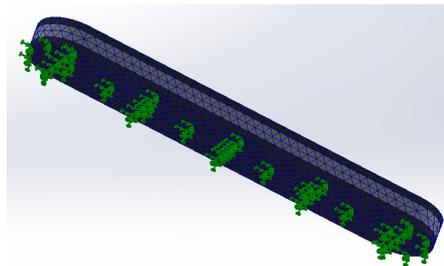


Рис. 3. 3D-модель з накладеною кінцево-елементною сіткою

Форма коливань показує, які відносні деформації (переміщення) випробовуватиме конструкція у разі виникнення резонансу на відповідній частоті. Форми коливань, відображаються у вікні постпроцесора після завершення розрахунку, являють собою відносні амплітуди коливань. Аналізуючи ці форми, можна зробити висновок про характер резонансних переміщень, але не про їхню фактичну амплітуду. Знаючи очікувану форму коливань на деякій власній частоті, наприклад, можна задати додаткове закріплення або опору в області конструкції, що відповідає максимуму даної форми коливань, що призведе до ефективної зміни спектральних властивостей виробу.

На (рис. 4) наведено візуалізацію результатів для перших чотирьох власних розрахованих власних частот шпоночної деталі.

На (рис. 5) бачимо масову участь коливань, яка повідомляє, які режими найбільш небезпечні і скільки частот необхідно, щоб точно захопити весь динамічний відгук конструкції (власна частота).

На (рис. 5) в таблиці ми бачимо, що серед усіх напрямків небезпечними є вздовж осі X , 3-я мода, сумарна ефективна маса – 0,97882 з частотою 7, 2172 Гц (рис. 6). Вздовж осі Y , 6-та мода, сумарна ефективна маса – 0,975 з частотою 22, 362 Гц. Вздовж осі Z , 1-ша мода, сумарна ефективна маса – 0,97265 з частотою 7, 0475 Гц.

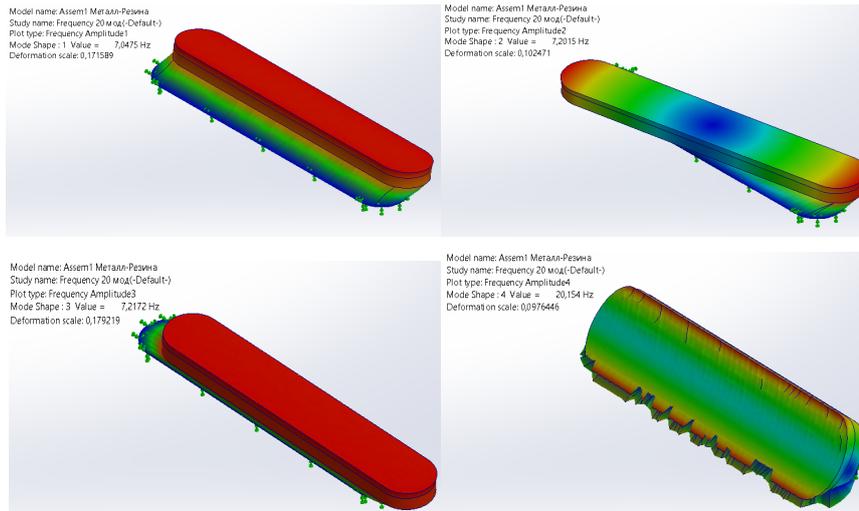


Рис. 4. Частоти та форми коливань шпонки

Частотні дослідження можуть допомогти уникнути резонансу та при проектуванні систем віброізоляції. Вони також формують базу для оцінки реакції лінійних динамічних систем, у яких реакція системи на динамічне середовище приймається рівною сумою вкладів мод, що враховуються в аналізі.

Висновки. 1. Полімерні матеріали мають низьку щільність, що робить їх легкими і зручними для використання. У той же час, вони мають високу міцність і стійкість до різних впливів, таких як удари, вібрації та корозія. Це дозволяє створювати міцні та довговічні вироби за мінімальної ваги. Крім того, полімерні матеріали мають довговічність і стійкість до зовнішніх впливів, що збільшує їх термін служби і знижує витрати на обслуговування та ремонт.

| Mode No. | Freq (Hertz) | X direction | Y direction | Z direction |
|----------|--------------|-----------------|-----------------|----------------|
| 1 | 7,0475 | 3,70E-06 | 2,12E-07 | 0,97265 |
| 2 | 7,2015 | 0,00027371 | 1,64E-08 | 7,51E-08 |
| 3 | 7,2172 | 0,97882 | 1,49E-09 | 3,75E-06 |
| 4 | 20,154 | 1,50E-08 | 9,96E-07 | 0,0066285 |
| 5 | 22,011 | 0,00013563 | 0,00011489 | 1,37E-07 |
| 6 | 22,362 | 2,84E-08 | 0,975 | 2,96E-07 |
| 7 | 45,439 | 6,08E-10 | 6,05E-09 | 6,97E-09 |
| 8 | 45,499 | 2,21E-09 | 4,63E-09 | 4,77E-10 |
| 9 | 45,605 | 4,65E-09 | 4,52E-09 | 2,83E-10 |
| 10 | 45,811 | 1,11E-11 | 3,02E-08 | 4,64E-12 |
| 11 | 45,865 | 1,35E-07 | 7,47E-07 | 7,41E-10 |
| 12 | 45,987 | 5,88E-08 | 5,10E-11 | 1,94E-08 |
| 13 | 46,051 | 1,97E-06 | 3,25E-08 | 1,98E-09 |
| 14 | 46,19 | 1,02E-08 | 6,43E-09 | 2,68E-08 |
| 15 | 46,234 | 3,49E-08 | 1,29E-07 | 2,49E-09 |
| 16 | 46,465 | 4,84E-08 | 1,37E-07 | 2,85E-07 |
| 17 | 46,594 | 2,38E-07 | 8,48E-08 | 1,70E-06 |
| 18 | 46,664 | 3,08E-07 | 4,43E-09 | 4,31E-06 |
| 19 | 46,801 | 3,10E-08 | 2,02E-08 | 4,10E-06 |
| 20 | 46,914 | 1,94E-09 | 7,89E-08 | 4,37E-06 |
| | | Sum X = 0,97924 | Sum Y = 0,97511 | Sum Z = 0,9793 |

Рис. 5. Масова участь коливань

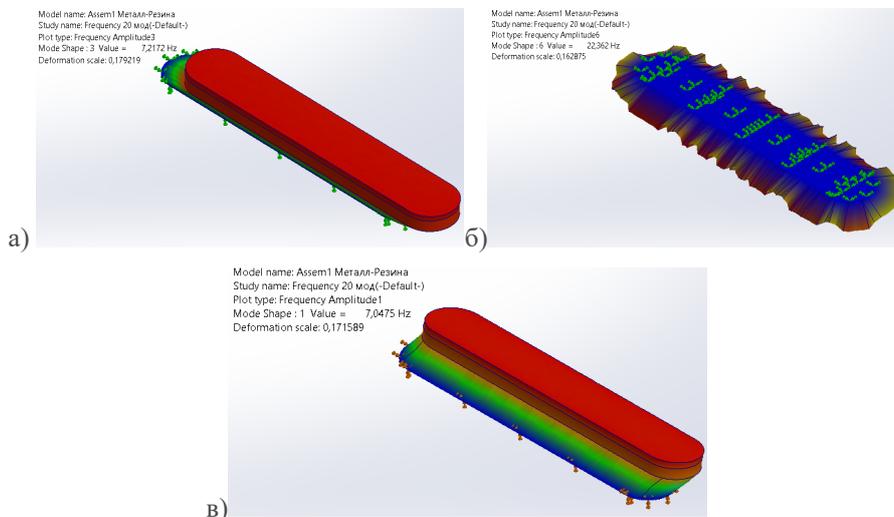


Рис. 6. Небезпечні коливання а) вздовж осі X в третій моді; б) вздовж осі Y, шоста мода; в) вздовж осі Z, перша мода

2. Особливим різновидом полімерних матеріалів є антифрикційні покриття, які не тільки перешкоджають зношуванню деталей, але і виконують функцію змащення. На відміну від звичайних полімерних покриттів, антифрикційні витримують тривалий вплив хімічно-агресивних середовищ та екстремальних навантажень. При цьому вони виконують не тільки захисну, але і функцію мастила, чим також віграють у полімерів.

3. Вільні коливання у чистому вигляді зустрічаються в механічних системах не надто часто. Проте їх вивчення дуже важливе, оскільки саме характеристики вільних коливань, такі як власні частоти та відповідні їм власні форми, повністю визначають індивідуальні фізичні та динамічні властивості механічної системи та мають найважливіше значення при аналізі вимурених коливань.

Список літератури:

1. Мелехов Р.К. Конструкційні матеріали енергетичного обладнання. Властивості, деградація // Мелехов Р.К., Похмурський В.І. – Київ, вид-во «Наукова думка», 2003. – 374 с.
2. Захист від корозії і моніторинг залишкового ресурсу промислових будівель, споруд та інженерних мереж / Матеріали наук.-практ. конф. (м.Донецьк, 9-12 червня 2003 р.) – Донецьк: УАМК, 2003. – 247 с.
3. Проблеми ресурсу і безпеки експлуатації конструкцій, споруд та машин / 36. наук, статей // Наук, керівник акад. Б.С. Патон. – Київ: ІЕЗ ім. Є.О. Патона НАН України. – 589 с.
4. H. Mahmoodi Khaha, O. Soleimani, Properties and Applications of Polymers: A Mini Review. J. Chem. Rev., 2023, 5(2), 204-220. <https://doi.org/10.22034/jcr.2023.383915.1213>
5. Пермяков В.О. Металеві конструкції. / Пермяков В.О., Нілов О.О., Шимановський О.В., Белов І.Д. та ін. // За заг. ред. В.О. Пермякова та О.В. Шимановського. – К.: Вид-во «Сталь», 2008. – 812 с.
6. Кузьменко М. Я., Бурмістр М. В., Кобельчук Ю. М. Технологія виробництва та перероблення високомолекулярних сполук: підручник. Кн. 2. Синтетичні смоли та полімери (синтез, властивості, застосування). Дніпропетровськ : ДВНЗ «Укр. держ. хім.-технол. ун-т», 2015. 489 с.
7. Тимофєєва Л.А., Комарова Г.Л. Матеріалознавство та технологія конструкційних матеріалів: Конспект лекцій. – Харків: УкрДАЗТ, 2013. – Ч. 1. 67 с.
8. Сосунов Н. Н. Підвищення ефективності процесів експлуатації та технічного обслуговування рухомого складу у системі ремонтних підприємств галузі. Вісник Східноукраїнського національного університету ім. В. Даля. Луганск, 2006. С. 219–223.
9. Коновал В. П. Стійкість до високотемпературного окислення композиційних матеріалів та покриттів на основі диборидатитану-хрому / Коновал В. П. // Доповіді НАН України. – 2015. – № 5. – С. 83–89.

Fomin O.V., Kozynka O.S., Fomina A.M., Lisnychy V.S. APPLICATION OF SOFT POLYMER COATINGS FOR LOAD-BEARING COMPONENTS OF ROLLING STOCK

The study investigates the application of soft polymer coatings for load-bearing components of rolling stock. Mechanical engineering is one of the key industries, and selecting the right material is essential for creating quality and reliable products. Various metals such as steel, aluminum, copper, iron, and titanium are widely used in mechanical engineering. Each has its unique properties that make it suitable for specific operating conditions. In polymer engineering, various technologies and materials are used to create products with diverse properties and functionalities. Polymers are large molecules made up of repeating units that can be processed and transformed into different shapes and structures. The article examines the application of rubber (rubber production), polymer coatings, polymer anti-friction coatings, the advantages and disadvantages of polymer coatings and their application, the benefits and challenges of polymer engineering, and its prospects. Various polymer materials, such as plastics, rubbers, composites, and others, are used in polymer engineering. These materials have different properties, such as strength, flexibility, resistance to chemical impacts and heat, making them ideal for use in various industrial sectors. Reviewing polymers and plastics, it can be said that they have general high-quality characteristics. Both compounds are used in different fields of human activity, for example, in machine production, agricultural purposes, medicine, aircraft manufacturing, shipbuilding, and more. Everyday human life cannot do without these substances. High-molecular compounds enable the production of various fibers, rubber, and plastics. We considered the intrinsic oscillatory processes occurring in various technical devices, which have a significant, often decisive impact on the operating conditions of these objects, their strength, and durability. When designing a mechanical object, it is important to understand how far or close to resonance its operating modes will be.

Key words: corrosion, polymer coatings, rubber, anti-friction coatings, intrinsic oscillations, rolling stock.

БУДІВНИЦТВО

УДК 625.7/8

DOI <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2024.4/52>**Аринушкіна Н.С.**

Харківський національний автомобільно-дорожній університет

Грищенко Т.М.

Харківський національний автомобільно-дорожній університет

ВИКОРИСТАННЯ СПІНЕНИХ БІТУМІВ ПРИ ВИКОНАННІ БУДІВЕЛЬНО-РЕМОНТНИХ РОБІТ НА АВТОМОБІЛЬНИХ ДОРОГАХ

У статті розглянуто питання приготування та застосування спінених бітумів у асфальтобетонних сумішах при виконанні будівельно-ремонтних робіт на асфальтобетонних покриттях, які мають ряд переваг в порівнянні з використанням у відповідних технологіях традиційних дорожніх бітумів.

На сучасному етапі дорожнього будівництва значну практичну цінність представляють технології виробництва та використання асфальтобетонних сумішей при температурах, що викликають значну економію матеріальних, трудових та фінансових ресурсів. При цьому також бажано забезпечити мінімальний негативний вплив на людину та навколишнє середовище. Основним завданням при виробництві асфальтобетонних сумішей у дорожньому будівництві є забезпечення надійності та якості готового продукту за мінімальних витрат і високої ефективності виробництва [1].

Вивчення процесів отримання спіненого бітуму проводиться у США, Австралії, Німеччині, ПАР, Новій Зеландії, Західній Європі та ін. Це було зумовлено зростанням цін на існуючі матеріали для дорожнього будівництва та необхідністю пошуку нових рішень. Спінений бітум використовувався для отримання холодних і гарячих асфальтобетонних сумішей в стаціонарних змішувачах періодичної та безперервної дії.

Досвід США показує, що гарячі асфальтобетонні суміші, отримані на основі спіненого бітуму, мають високі фізико-хімічні властивості та добре зарекомендували себе при влаштуванні дорожніх покриттів на автомобільних дорогах високих категорій.

Зниження експлуатаційних та енергетичних витрат на приготування асфальтобетонних сумішей та зниження навантаження на екологію є одним із найважливіших завдань у дорожньому будівництві, що особливо актуально в теперішній час.

Саме з цих причин впровадження технології приготування асфальто-бетонних сумішей на основі спіненого бітуму є важливим завданням, яке постає перед шляхобудівниками нашої держави.

Ключові слова: спінений бітум, приготування спіненого бітуму, асфальтобетонне покриття, асфальтобетонні суміші, ремонтні роботи.

Постановка проблеми. В сучасних умовах є актуальним застосування технологій приготування асфальтобетонних сумішей з використанням спінених бітумів при виконанні будівельно-ремонтних робіт для підвищення транспортно-експлуатаційного стану автомобільних доріг, економії матеріалів, зменшення вартості робіт з забезпеченням високої якості, особливо актуально при мінімальному фінансуванні дорожньої галузі у військовий період.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Питаннями застосування сучасних технологій

приготування асфальтобетонних сумішей з використанням спінених бітумів при виконанні будівельно-ремонтних робіт на автомобільних дорогах займалися вчені Савенко В. Я., Желтобрюх А. Д., Малій П. Р., Одегова Т. С., Тимошук О. Ю., Ілляш С. І., Мудриченко А. Я. та інші, які відображені в роботах [1, 2, 3, 4, 5].

Постановка завдання. В умовах обмеженого фінансування стан асфальтобетонного покриття автомобільних доріг суттєво погіршується.

Одним з методів підвищення показників якості та зниження витрат при виробництві асфальто-

бетонних сумішей є застосування спінених бітумів. Протягом тривалого часу процес спінювання бітуму при його нагріванні до температур вище 100 °С розглядався як негативний при виробництві асфальтобетонних сумішей, оскільки призводив до аварійних пожежо-небезпечних ситуацій, порушень норм і правил охорони праці, супроводжувався додатковими енергетичними витратами і збільшенням кількості в'язучого.

З початку 90-х років почали проводитися широкі експериментальні та теоретичні дослідження з використання бітумів у спіненому стані в процесі приготування асфальтобетонних сумішей, стала створюватися нова технологія – технологія приготування асфальтобетонних сумішей з використанням спінених бітумів, що забезпечує збереження енергії, матеріалів та зменшення навантаження, за рахунок зниження температури змішування компонентів та термічного розкладання в'язучого.

Спінений бітум (бітумна піна) – полідисперсна система, в якій дисперсною фазою є газ (повітря, пара), а дисперсійним середовищем – бітум. У такій системі загальний об'єм дисперсної фази перевищує 50 %, а об'єм бітуму при його насиченні газом збільшується у 2 та більше разів у порівнянні з початковим. Спінені бітуми характеризуються малою в'язкістю, великою поверхневою енергією, високою активністю до взаємодії з поверхнею мінеральних матеріалів, завдяки чому суттєво полегшується процес перемішування суміші, відбувається більш рівномірний та повний розподіл в'язучого. В результаті перерозподілу групових сполук в об'ємі бітуму при його спінюванні, можливе зниження витрати в'язучого, суттєве підвищення продуктивності змішувального обладнання, зниження максимальної температури нагрівання вихідних компонентів, що дає підставу розглядати цю технологію як енерго- і матеріалозберігаючу.

Виклад основного матеріалу. Застосування спінених бітумів у дорожньому будівництві було обумовлено зростанням цін на гарячі асфальтобетонні суміші та необхідністю пошуку менших за вартістю матеріалів та способів їх приготування.

Застосування спінених бітумів є актуальним як при будівництві нових асфальтобетонних покриттів так і при виконанні ремонтних робіт методом холодного рециркулювання.

Вперше в зарубіжній практиці (США) було запропоновано змішувати холодні мінеральні матеріали з бітумною піною, яку отримували спінюванням бітуму парою.

В результаті недостатнього досвіду приготування спінених бітумів якість асфальтобетонних сумішей була незадовільною, що призводило до зниження терміну служби дорожніх покриттів.

Аналіз досвіду застосування спінених бітумів у дорожньому будівництві Австралії (бітум спінювався парою, яка подавалася зі спеціального сопла) показав, що при спінюванні значно збільшувалася питома поверхня і знижувалася в'язкість бітуму, досягалася якісне обволікання навіть вологих поверхонь мінеральних матеріалів. Недоліком цієї технології було те, що вона не забезпечувала отримання бітумів із постійними властивостями.

Фірмою "Mobil Oil Australia Ltd" (Австралія) були розроблені спосіб спінювання за допомогою введення в потік гарячого бітуму холодної води та пристрій для його здійснення. В результаті взаємодії з водою бітум спінювався і розбризувався із спеціальної ємності через сопла. Витрата бітуму була постійною, а витрата води регулювалася за допомогою затисненого вентиля. При спінюванні до гарячого бітуму вводиться від 1 до 2 % води або пари від маси бітуму. При цьому ступінь зпінення становить 10–15, а стійкість піни – 2–3 хв. Перевагами даної технології є незначні капітальні витрати та виключення застосування парогенераторів.

Застосування спінених бітумів вносить ряд змін до технологічної схеми приготування асфальтобетонних сумішей, які стосуються процесів підготовки та подачі бітуму, що забезпечують його введення в змішувач у спіненому стані.

Більш широкого розповсюдження набули два способи спінювання бітумів: спінювання та розпилення бітуму холодною водою або парою, яку одержують в парогенераторах або централізовано по системі теплопостачання; спінювання та розпилення попередньо обводненого бітуму за рахунок збільшення тиску при його нагріванні до температури вище 100 °С у спеціальному герметичному підігрівачі перед подачею в мішалку [6].

Вибір технологічного процесу підготовки, подачі до мішалки і введення в неї бітуму в спіненому стані значною мірою залежить від способу спінювання.

Метою вдосконалення технології ремонту асфальтобетонних покриттів із застосуванням спінених бітумів є поліпшення адгезійних властивостей, що забезпечують міцне та стійке зчеплення з поверхнею мінеральних матеріалів різної природи та міжшарового зчеплення в умовах знижених температур. Тому при розробці нових

технологій та способів застосування дорожніх бітумів для приготування асфальтобетонних сумішей питання адгезії з поверхнею мінеральних матеріалів повинні займати центральне місце. При цьому під адгезією розуміють зчеплення між поверхнями двох різних контактуючих матеріалів – бітуму та мінерального матеріалу.

Утворенню тонких бітумних плівок на мінеральній поверхні передують її змочування бітумом, величина якого визначається природою мінерального матеріалу та силою поверхневого натягнення бітуму.

Появі тонких плівок бітуму при традиційній технології приготування асфальтобетонних сумішей сприяє підвищення температури, введення пластифікаторів, збільшення тривалості перемішування суміші, що призводить до підвищення енерговитрат, зниження продуктивності, до погіршення фізико-механічних характеристик отриманого матеріалу. Найбільш ефективним є спосіб, що передбачає зниження поверхневого натягу бітуму, шляхом переведення бітуму в спінений стан змішуванням гарячого в'язучого з вологим мінеральним матеріалом. Процес спінування бітуму покращує процес змочування мінеральної поверхні і підвищує їх адгезію.

Як правило, міцність зчеплення бітумних плівок з поверхнею мінерального матеріалу може залежати від багатьох випадкових факторів, а також методу її оцінки. Показники міцності зчеплення органічних речовин із поверхнею оцінюють різними методами, особливості яких залежать від специфіки роботи клейових сполук.

При використанні спіненого бітуму відбувається більш рівномірний розподіл в'язучого в суміші, що супроводжується обволіканням усіх мінеральних частинок тонкою бітумною плівкою. Найкраще обволікання мінеральних зерен бітумом досягатиметься при швидкому змочуванні ним поверхні мінерального матеріалу. Змочування мінерального матеріалу бітумом буде краще, якщо поверхневий натяг його буде нижчим. Тому застосування спінених бітумів краще, так як при спінуванні поверхневий натяг бітуму знижується. Крім того, підвищена адгезія спіненого бітуму з мінеральною поверхнею обумовлена попередньою концентрацією активних сполук в поверхневому шарі в'язучого, що зумовлює підвищення його активності до хімічної взаємодії.

Застосування спіненого бітуму забезпечує більш якісну обробку мінеральної суміші та міцніше закріплення в'язучого на поверхні мінеральних матеріалів, незалежно від схеми подачі компонентів у змішувальний агрегат.

Зусилля, що виникають у піні при контакті з мінеральною поверхнею і подальшому розпаді, відбуваються раніше, ніж у разі використання звичайного бітуму, стають сумірними і починають перевищувати сили адгезії дрібнодисперсних часток до поверхні крупного заповнювача. При цьому бітум, що виділяється при розпаді найближчого шару піни, змочує поверхню мінеральних зерен тонким шаром, що сприяє поліпшенню фізико-механічних показників асфальтобетону, виготовленого на спіненому бітумі, у порівнянні з асфальтобетоном, який виготовлений на в'язкому бітумі.

При використанні спінених бітумів, відмінність технології приготування асфальтобетонних сумішей полягає у наявності устаткування для приготування спіненого бітуму.

Укладання та ущільнення асфальтобетонних сумішей на спінених бітумах, може відбуватися при температурі на 15–25 °С нижче у порівнянні із гарячими асфальтобетонними сумішами [6].

Спінений бітум можна застосовувати також при холодній регенерації асфальтобетонних покриттів.

Холодний ресайклінг з додаванням спіненого бітуму може виконуватися за методом «на місці» або методом «в установці». У ході холодного ресайклінгу за методом «на місці» отриманий асфальтовий гранулят змішується ресайклером зі спіненим бітумом (рис. 1) та під час однієї робочої операції створюється нова суміш [7, 8, 9, 10].

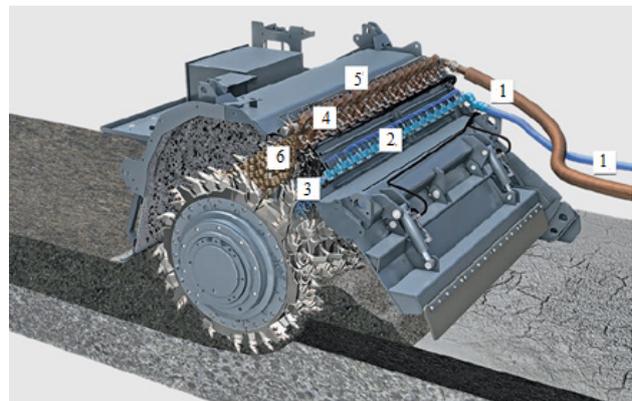


Рис. 1. Холодний ресайклінг з додаванням спіненого бітуму за методом «на місці»
 1 – шлангові з'єднання; 2 – розподільна рампа для води; 3 – вода для впорскування; 4 – розподільна рампа для спіненого бітуму; 5 – розширювальні камери; 6 – введений спінений бітум

Холодний ресайклер, що працює за методом «на місці», оснащений потужним фрезерно-змішувальним ротором, а також системою впорскування. Деякі типи машин також мають вирівнюючий брус, який виконує розрівнювання

і попереднє ущільнення нової суміші. Після ущільнення суміші утворюється шар високої якості, який здатний витримувати максимальне транспортне навантаження.

У ході холодного ресайклінгу методом «в установці» знятий асфальтогранулят транспортується до установки для приготування холодної суміші. В установці асфальтогранулят обробляється спініним бітумом та створюється нова готова до укладання холодна суміш яку можна використовувати безпосередньо для укладання шару або зберігати на складах.

Додавання спіненого бітуму в рецикльований асфальтобетонний гранулят дозволяє повністю переробляти його без обмеження терміну перебування його в холодному стані. Переробка без підігрівання вихідного матеріалу дозволяє значно зменшити викиди CO₂. Додавання в'язучого у кількості від 1,5 % до 2,5 % від обсягу всієї суміші істотно зменшує витрати на новий матеріал. Укладання матеріалу проводиться відразу після приготування суміші. Після укладання та ущільнення шару дорожній рух відразу відновлюють, призведе до скорочення термінів будівництва.

Висновки. З викладеного у статті матеріалу можна зробити висновки про те що асфальтобетон на спіненому бітумі, є найбільш економічний та ресурсозберігаючий спосіб виробництва асфальтобетонних сумішей для будівництва та ремонту асфальтобетонних покриттів за рахунок зниження температури при виготовленні, укладанні та ущільненні суміші, скорочення часу перемішування суміші що сприяє підвищенню строків служби дорожніх покриттів.

Використання меншої кількості вихідного бітуму у порівнянні із традиційними технологіями, дозволяє зменшити вартість асфальтобетонної суміші.

Метод холодної регенерації з використанням спіненого бітуму та асфальтогрануляту дозволяє виготовляти більш дешеву асфальтобетонну суміш у порівнянні з сумішшю виготовленою з нових матеріалів.

Застосування спініних бітумів дозволить виконувати значні обсяги ремонтно-будівельних робіт в умовах обмеженого фінансування, що вирішить питання швидкого відновлення дорожньої мережі автомобільних доріг України у стислі строки.

Список літератури:

1. Желтобрюх А.Д., Малій П.Р., Одегова Т.С., Тимошук О.Ю. Використання асфальтобетонних сумішей на основі спіненого бітуму. *Дороги і мости*. Київ, 2019. Вип. 19-20. С. 94-106.
2. Савенко В.Я, Ілляш С.І., Мудриченко А.Я. Аналіз фізико-механічних характеристик теплих асфальтобетонних сумішей на основі бітуму з додаванням енергозберігаючих добавок та спіненого бітуму. *Дороги і мости*. Київ. 2022. Вип. 25. С. 87-98.
3. Sarvesh Kumrawat, Vinay Deulkar. Foamed Bitumen. *International research journal of engineering and technology*. India, 2018. 5. P. 401-404.
4. K.J. Jenkins, M.F.C. van de Ven, JLA de Groot. Characterization of foamed bitumen. 7th Conference on asphalt pavements for Southern Africa, 1999. P. 18.
5. Дорожні покриття. Рециклювання дорожніх одягів: посіб. з холодного рециклювання дорожніх одягів із використанням бітумної емульсії або спіненого бітуму. Ч. 2 / за заг. ред. В.К. Жданюка і Д. Сибільського. Харків: ХНАДУ, 2006. 76 с.
6. Рекомендації щодо приготування та застосування асфальтобетонних сумішей на основі спініних бітумів (Р В.2.7-37641918-894:2018). Київ, 2018, 30 с. (Інформація та документація).
7. Дорожні покриття. Рециклювання дорожніх одягів: посіб. з холодного рециклювання дорожніх одягів із використанням бітумної емульсії або спіненого бітуму. Ч.2 / за заг. ред. В.К. Жданюка і Д. Сибільського. Харків: ХНАДУ, 2006. 76 с.
8. Арінушкіна Н.С., Грищенко Т.М. Аналіз сучасних способів регенерації дорожніх покриттів. *Вчені записки ТНУ імені В.І. Вернадського. Серія: Технічні науки. Будівництво*. Київ. 2022. Видавничий дім «Гельветика». Том 33 (72). № 6. С. 264-269.
9. Ільченко В.В. Відновлення дорожніх одягів із застосуванням технології холодного фрезування. *Збірник наукових праць (галузеве машинобудування, будівництво)*. – Полтава: ПолтНТУ, 2006. Вип. 18. С. 135-138.
10. ДСТУ 8978:2020. Настанова з улаштування шарів дорожнього одягу за технологією холодного ресайклінгу. [Чинний від 2021-01-05]. Київ, 2020. 17 с.

Arinushkina N.S., Hryshchenko T.M. USE OF FOAMED BITUMEN IN EXECUTION VEHICLE CONSTRUCTION AND REPAIR WORKS ROADS

The article discusses the preparation and use of foamed bitumen in asphalt concrete mixtures during construction and repair work on asphalt concrete surfaces, which have a number of advantages compared to the use of traditional road bitumen in the corresponding technologies.

At the current stage of road construction, technologies for the production and use of asphalt-concrete mixtures at temperatures that cause significant savings in material, labor, and financial resources represent significant practical value. At the same time, it is also desirable to ensure minimal negative impact on people and the environment. The main task in the production of asphalt concrete mixtures in road construction is to ensure the reliability and quality of the finished product at minimal costs and high production efficiency [1].

The study of foamed bitumen production processes is carried out in the USA, Australia, Germany, South Africa, New Zealand, Western Europe, etc. This was due to the increase in prices for existing materials for road construction and the need to find new solutions. Foamed bitumen was used to obtain cold and hot asphalt concrete mixes in stationary batch and continuous mixers.

The experience of the USA shows that hot asphalt concrete mixtures obtained on the basis of foamed bitumen have high physico-chemical properties and have proven themselves well in the installation of road surfaces on highways of high categories.

Reduction of operational and energy costs for the preparation of asphalt concrete mixtures and reduction of environmental burden is one of the most important tasks in road construction, which is especially relevant nowadays.

It is for these reasons that the introduction of the technology for preparing asphalt-concrete mixtures based on foamed bitumen is an important task facing the road builders of our country.

Key words: *foamed bitumen, preparation of foamed bitumen, asphalt concrete coating, asphalt concrete mixtures, repair works.*

Костін Д.Ю.

Харківський національний автомобільно-дорожній університет

Арінушкіна О.О.

Харківський національний автомобільно-дорожній університет

Тетера В.С.

Харківський національний автомобільно-дорожній університет

Сунь Д.

Харківський національний автомобільно-дорожній університет

ВПЛИВ ГЕНЕЗИСУ ВИХІДНОЇ СИРОВИНИ НА МОРОЗОСТІЙКІСТЬ КРУПНОЗЕРНИСТИХ ЩЕБЕНЕВО-ПІЩАНИХ СУМІШЕЙ, УКРІПЛЕНИХ ЦЕМЕНТОМ

У статті розглянуто вплив гранулометричного складу та генезису вихідної сировини на коефіцієнти морозостійкості щебенево-піщаних сумішей з максимальним розміром зерен щебеню 40 мм укріплених цементом.

На сьогодні для запобігання виникнення температурних тріщин в шарах основи дорожніх одягів найчастіше використовують щебенево-піщані суміші укріплені цементом або комплексним в'язучим з марками за міцністю М20 та М40. Під час виконання робіт з науково-технічного супроводу об'єктів поточного середнього, капітального ремонтів та реконструкції автомобільних доріг Державного та місцевого значення, згідно вимог чинних стандартів, у випробувальній лабораторії кафедри будівництва і експлуатації автомобільних доріг ХНАДУ виконували дослідження властивостей матеріалів із щебенево-піщаних сумішей укріплених цементом, а також визначення їх коефіцієнта морозостійкості. За цей час встановлено, що зерновий склад ЩПС суттєво впливає на кількість цементу, необхідну для отримання однакової за міцністю марки укріпленого матеріалу, а також його морозостійкість. Очевидно, що для матеріалів з укріплених цементом ЩПС, які використовують в шарах основи при будівництві дорожніх одягів, вимоги до величини коефіцієнта морозостійкості повинні бути ранжовані не лише від марки матеріалу за міцністю, а і від його гранулометричного складу.

Виконані дослідження показують, що щебенево-піщаним сумішам з гранітної сировини які укріплені цементом, властиві менші значення показника границі міцності при стиску в порівнянні з сумішами з залістистих кварцитів, при однаковій концентрації цементу. За однаковій концентрації цементу укріплені суміші гранулометричного складу з максимальним вмістом зерен щебеню, мають більшу міцність в порівнянні з гранулометричним складом з мінімальним вмістом зерен щебеню. Досліджені значення показників морозостійкості відповідають вимогам чинного Державного стандарту, що висуваються до морозостійкості згідно відповідних марок за міцністю.

Ключові слова: Щебенево-піщана суміш, укріплення цементом, гранулометричний склад, марка за міцністю, морозостійкість.

Постановка проблеми. Під час виконання робіт з науково-технічного супроводу встановлено, що зерновий склад ЩПС суттєво впливає на кількість цементу, необхідну для отримання однакової за міцністю марки укріпленого матеріалу, а також його морозостійкість. Дана обставина, повинна бути врахована під час призначення того чи іншого матеріалу в конструктивний шар дорожнього одягу та під час нормування цього показника.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Питаннями довговічності щебенево-піщаних

сумішей укріплених цементом займалися вчені В.К. Жданюк, А.М. Онищенко, М.В. Гаркуша, А.С. Лапченко, С.Й. Солодкий, А. Білятинський, Д.Ю. Костін, Сунь Дзянь. Вони відображені в роботах [1, 2, 3, 4, 6, 7, 8].

Постановка завдання. Згідно вимог чинних вимог щебенево-піщані суміші (ЩПС) укріплені цементом поділяють на крупнозернисті з максимальним розміром фракції 40 м, середньозернисті з максимальним розміром фракції 20 мм, дрібнозернисті з максимальним розміром зерен щебеню

10 мм та піщані з максимальним розміром кам'яного матеріалу до 5 мм. Раніше виконаними дослідженнями у випробувальній лабораторії кафедри будівництва і експлуатації автомобільних доріг ХНАДУ [1-4], встановлено, що зерновий склад ЩПС суттєво впливає на кількість цементу, необхідну для отримання однакової за міцністю марки укріпленого матеріалу, а також його морозостійкість. Ця обставина, аналіз нормативної бази та останніх публікацій підтверджує актуальність проведення досліджень в цьому напрямку.

Виклад основного матеріалу дослідження. Метою даного дослідження було визначення впливу генезису мінеральних матеріалів та гранулометричного складу, що використовуються для приготування щебенево-піщаних сумішей, на показник морозостійкості укріплених цементом матеріалів.

Для проведення досліджень було обрано крупнозернисту щебенево-піщану суміш укріплену цементом (ЩПС. Кр. Ц) згідно [9], мінеральна частина якої була представлена сировиною з залістистих кварцитів та гранітною сировиною. Вищезгадані матеріали були розділені на фракції, після чого готувалися суміші двох гранулометричних складів з максимальним і мінімальним вмістом щебеню, які мали умовні позначення I та II. Прийняті для подальших досліджень гранулометричні склади зображені на рисунках 1 та 2.

Дослідження морозостійкості виконувалось для сумішей зміцнених цементом у кількості 4, 6 та 8%. Згідно чинних методів випробувань, було виготовлено серії зразків, які в водонасиченому стані були підвержені циклам заморожування-відтавання. Результати випробувань показали, що для всіх досліджуваних сумішей з вмістом 4% вони відповідають майже максимальним граничним значенням що відповідають марки М20, з 6% до марки М40, з 8% до марки М60. Для всіх досліджуваних щебенево-піщаних сумішей укріплених цементом максимальна кількість циклів заморожування-відтавання становила – 25.

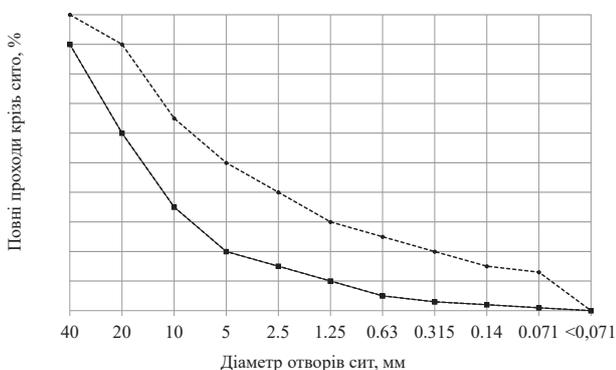


Рис. 1. Гранулометричний склад суміші ЩПС. Кр. Ц (I)

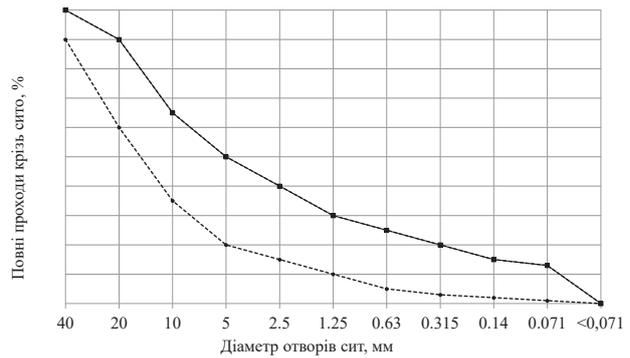


Рис. 2. Гранулометричний склад суміші ЩПС. Кр. Ц (II)

Фото деградації зразків укріплених щебенево-піщаних сумішей ЩПС. Кр. Ц (I) із залістистих кварцитів в залежності від кількості циклів заморожування-відтавання наведено на рисунках 3–5.



Рис. 3. ЩПС.Кр.Ц(I) із залістистих кварцитів, укріплених 4% цементу

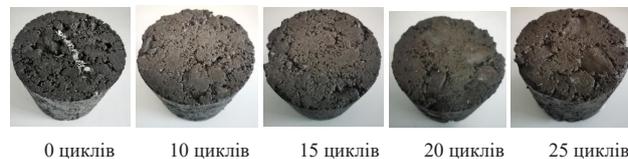


Рис. 4. ЩПС. Кр. Ц (I) із залістистих кварцитів, укріплених 6% цементу



Рис. 5. ЩПС. Кр. Ц (I) із залістистих кварцитів, укріплених 8% цементу

Значення показників границі міцності при стиску ЩПС.Кр.Ц (I) з залістистих кварцитів, укріпленої цементом наведено на рисунку 1.6.

Обчислені значення коефіцієнта морозостійкості наведено на рисунку 7.

Фото деградації зразків укріплених щебенево-піщаних сумішей ЩПС.Кр.Ц (I) із граніту в залежності від кількості циклів заморожування-відтавання наведено на рисунках 8–10.

Значення показників границі міцності при стиску ЩПС. Кр. Ц (I) з граніту, укріпленої цементом наведено на рисунку 11.

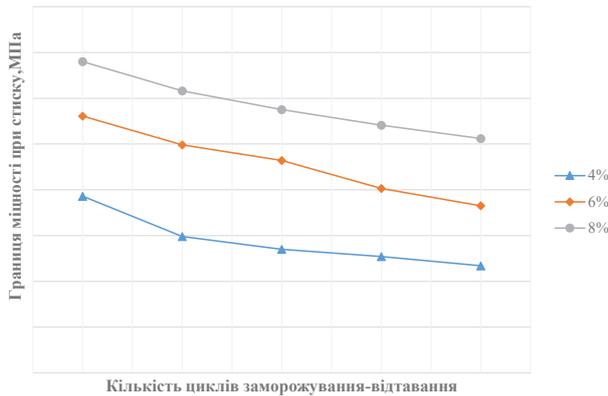


Рис. 6. Залежність зміни показників границі міцності при стиску ЩПС. КР. Ц (I) з залізистих кварцитів, укріпленої цементом

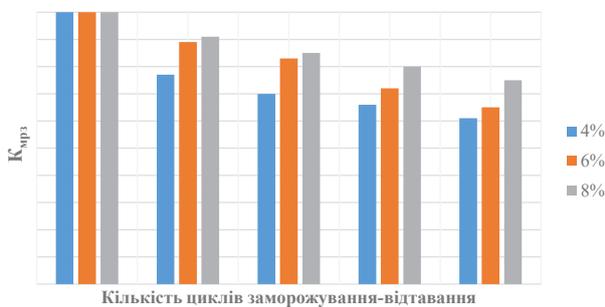


Рис. 7. Коефіцієнти морозостійкості ЩПС.КР.Ц (I) з залізистих кварцитів, укріпленої цементом



Рис. 8. ЩПС. Кр. Ц (I) із гранітних сумішей, укріплених 4% цементу



Рис. 9. ЩПС. Кр. Ц (I) із гранітних сумішей, укріплених 6% цементу



Рис. 10. ЩПС. Кр. Ц (I) із гранітних сумішей, укріплених 8% цементу

Обчислені значення коефіцієнта морозостійкості наведені на рисунку 12.

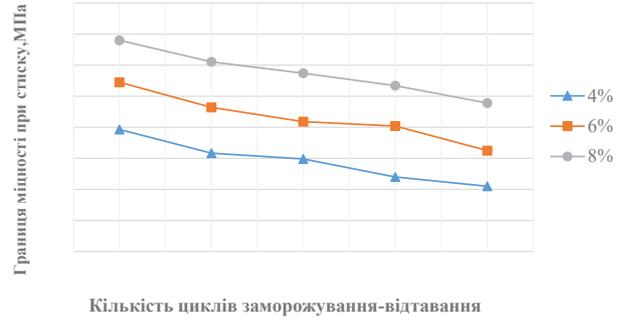


Рис. 11. Залежність зміни показників границі міцності при стиску ЩПС. КР. Ц (I) з граніту, укріпленої цементом

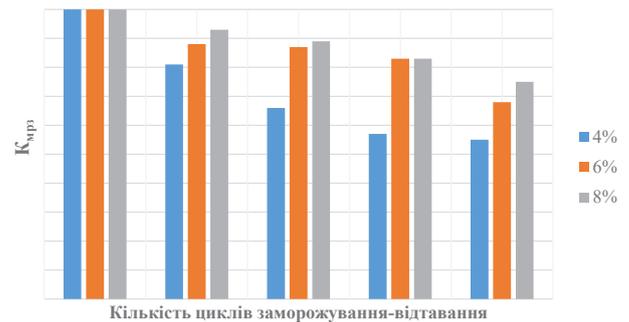


Рис. 12. Коефіцієнт морозостійкості ЩПС. КР. Ц (I) з граніту, укріпленої цементом

Фотографії деградації зразків щебенево-піщаних сумішей ЩПС.КР.Ц (II) із залізистих кварцитів в залежності від кількості циклів заморожування-відтавання наведені на рисунках 13–15.



Рис. 13. ЩПС. КР. Ц (II) із залізистих кварцитів, укріплених 4% цементу



Рис. 14. ЩПС. КР. Ц (II) із залізистих кварцитів, укріплених 6% цементу



Рис. 15. ЩПС. КР. Ц (II) із залізистих кварцитів, укріплених 8% цементу

Значення показників границі міцності при стиску ЩПС.КР.Ц (II) з залізистих кварцитів, укріпленої цементом наведено на рисунку 16.

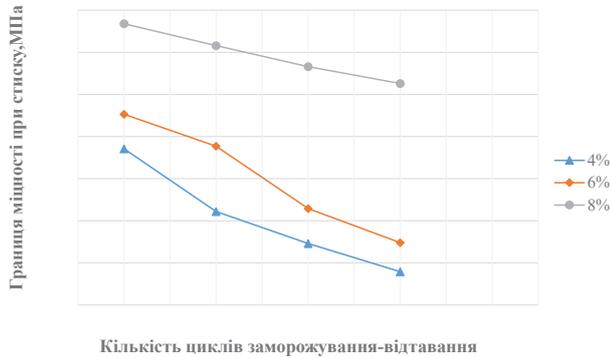


Рис. 16. Залежність зміни показників границі міцності при стиску ЩПС. КР. Ц (II) з залізистих кварцитів, укріпленої цементом

Обчислені значення коефіцієнта морозостійкості наведені на рисунку 17.

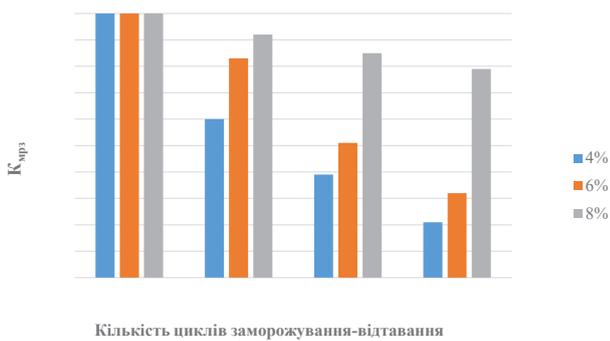


Рис. 17. Коефіцієнт морозостійкості ЩПС. КР. Ц (II) з залізистих кварцитів, укріпленої цементом

Фото зразків укріплених щебенево-піщаних сумішей із граніту ЩПС.Кр.Ц (II) в залежності від кількості циклів заморожування-відтавання наведено на рисунках 18–20.



Рис. 18. ЩПС.Кр.Ц (II) із гранітних мінеральних матеріалів, що укріплені 4 % цементу



Рис. 19. ЩПС. Кр. Ц (II) із гранітних мінеральних матеріалів, що укріплені 6 % цементу



0 циклів 10 циклів 15 циклів 20 циклів 25 циклів

Рис. 20. ЩПС. Кр. Ц (II) із гранітних мінеральних матеріалів, що укріплені 8 % цементу

Значення показників границі міцності при стиску ЩПС.КР.Ц (II) з граніту, укріпленої цементом наведено на рисунку 21.

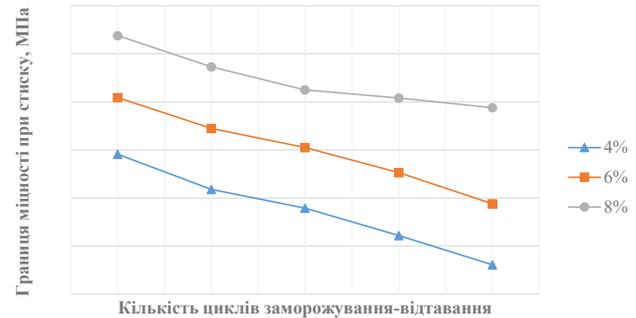


Рис. 21. Залежність зміни показників границі міцності при стиску ЩПС. КР. Ц (II) з граніту, укріпленої цементом

Обчислені значення коефіцієнта морозостійкості наведені на рисунку 22.

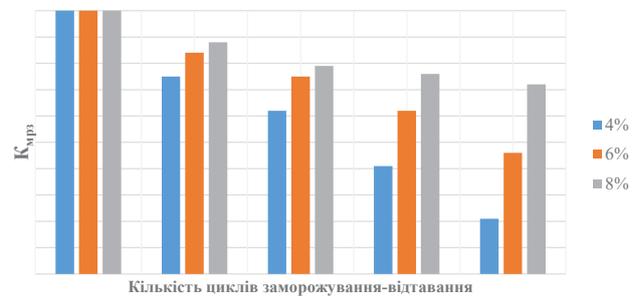


Рис. 22. Коефіцієнт морозостійкості ЩПС. КР. Ц (II) з граніту, укріпленої цементом

Отримані результати дослідження показують, що щебенево-піщаним сумішам з гранітної сировини які укріплені цементом, властиві менші значення показника границі міцності при стиску в порівнянні з сумішами з залізистих кварцитів, при однаковій концентрації цементу. Також, при однаковій концентрації цементу укріплені суміші гранулометричного складу I (з максимальним вмістом зерен щебеню) мають більшу міцність в порівнянні з гранулометричним складом II (з мінімальним вмістом зерен щебеню).

Результати досліджень підтверджують той факт, що зі збільшенням циклів заморожування-відтавання коефіцієнт морозостійкості зменшується. Щебенево-піщаним сумішам з гранітної сировини що укріплені цементом, властиві більші значення коефіцієнта морозостійкості, в порівнянні з щебенево-піщаними сумішами з залізистих кварцитів.

Порівнюючи отримані значення показників морозостійкості з нормованими згідно [1], можна зробити висновок, що всі досліджувані суміші відповідають вимогам, що висуваються до морозостійкості згідно відповідних марок за міцністю.

Висновки. Щебенево-піщаним сумішам з гранітної сировини, що укріплені цементом, властиві менші значення показника границі міцності при

стиску в порівнянні з сумішами з залізистих кварцитів, при однаковій концентрації цементу. При однаковій концентрації цементу укріплені суміші граничного гранулометричного з максимальним вмістом зерен щебеню, мають більшу міцність в порівнянні з граничним гранулометричним складом з мінімальним вмістом зерен щебеню. Щебенево-піщаним сумішам з гранітної сировини що укріплені цементом, властиві більші значення коефіцієнта морозостійкості, в порівнянні з щебенево-піщаними сумішами з залізистих кварцитів. Отримані значення показників морозостійкості відповідають вимогам чинного Державного стандарту, що висуваються до морозостійкості згідно відповідних марок за міцністю.

Список літератури:

1. Жданюк В.К., Костін Д.Ю., Арінушкіна О.О. Дослідження впливу комбінованих в'язучих на властивості щебенево-піщаних сумішей // Міжнародний збірник (за галузями знань «Машинобудування та металообробка», «Інженерна механіка», «Металургія та металознавство») Луцьк: ЛНТУ, – 2016. Вип. 46. – 7 с.
2. Жданюк В.К., Костін Д.Ю., Арінушкіна О.О., Павлютін К.О. Дослідження міцності щебенево-піщаних сумішей, укріплених портландцементом // Матеріали всеукраїнської науково-практичної конференції «Сучасні технології будівництва й експлуатації автомобільних доріг» Харків: ХНАДУ, 2016. – С. 53-57.
3. Арінушкіна О.О., Жданюк В.К. Укріплені цементом щебенево-піщані суміші для будівництва дорожніх одягів автомобільних доріг. // Науковий вісник будівництва. Харків: ХНУБА – 2016. № 1(83). – С. 120-125.
4. Костін Д.Ю., Арінушкіна О.О. Сунь Цзянь. Дослідження морозостійкості щебенево-піщаних сумішей, зміцнених цементом // Вісник ХНАДУ. Харків: ХНАДУ – 2023. вип.103. – С. 198-204.
5. Sun J., Zhdaniuk V., He Y., Bielatynskiy A. Study on Application of Iron Tailings in Cement Stabilized Macadam // Key Engineering Materials, 2023. – p. 231-246.
6. Солодкий С. Й. Ефективність дорожніх основ під бетонні покриття із матеріалів, укріплених цементом / С. Й. Солодкий, І. Ю. Думич, Ю. В. Турба // Вісник Національного університету "Львівська політехніка". Теорія і практика будівництва. – 2019. № 912. – С. 183-186.
7. Онищенко А.М., Гаркуша М.В., Лапченко А.С. Методика розрахунку колієстійкості асфальтобетонного покриття нежорсткого дорожнього одягу з урахуванням укріплення основи // Автомобільні дороги і дорожнє будівництво. Національний транспортний університет. – 2015. Випуск № 93. – С. 67-78.
8. Жданюк В.К., Сунь Дзянь. Дослідження впливу добавок катіонного латексу та базальтової фібри на розрахункові характеристики щебенево-піщаних сумішей із залізистих кварцитів, зміцнених цементом// Вісник ХНАДУ. Харків: ХНАДУ – 2024. вип.104. – с. 81-87.
9. Матеріали щебеневої та гравійної для дорожнього будівництва. Технічні умови. Частина 3. Матеріали, укріплені мінеральними в'язучими»: ДСТУ 9177-3:2022. – [Чинний від 2023-01-01]. – К.: УкрНДНЦ, 2023. – 20 с. – (Державний стандарт України).
10. Грунти, укріплені в'язучим. Методи випробувань. ДСТУ Б В.2.7-309:2016 [Чинний від 2017-01-01]. – К.: Мінрегіонбуд України, 2016. – 30 с. – (Державний стандарт України).

Kostin D. Yu., Arinushkina O. O., Tetera V. S., Sun D. THE INFLUENCE OF THE INITIAL RAW MATERIAL GENESIS ON THE FROST RESISTANCE OF CEMENT STABILIZED AGGREGATE MIXTURES

The influence of the granulometric composition and genesis of the raw material on the frost resistance coefficients of cement stabilized aggregate mixtures with a maximum size of crushed stone grains of 40 mm is studied in the article.

Today for the prevention of the temperature cracks appearance in the base layers of road pavement the aggregate mixtures stabilized by cement or a complex binder up to the M20 and M40 strength grades are most often used. During the performance of works on scientific and technical support of objects of the current, capital repairs and reconstruction of highways of state and local importance, in accordance with the requirements of current standards, in the testing laboratory of the Department of Highway Building and Maintenance of the

Kharkiv National Automobile and Highway University the research of the properties of materials from cement stabilized aggregate mixtures as well as determination of their frost resistance coefficient was carried out. It has been established that the grain composition of the aggregate mixtures has a significant influence on the amount of cement required to obtain the same grade of stabilized material with the same strength, as well as its frost resistance. It is obvious that for the cement-stabilized aggregate mixtures materials, which are used in the base layers of road pavements construction, the requirements for the value of the frost resistance coefficient should be ranked not only by the brand of the material in terms of strength, but also by its granulometric composition.

The conducted studies show that cement stabilized aggregate mixtures from granite raw materials are characterized by lower values of the compressive strength index compared to mixtures from ferruginous quartzite, with the same concentration of cement. At the same concentration of cement, reinforced mixtures of granulometric composition with the maximum content of crushed stone grains have higher strength indexes in comparison with the granulometric composition with a minimum content of crushed stone grains. The studied values of frost resistance indicators meet the requirements of the current State Standard, which are put forward to frost resistance according to the corresponding strength brands.

Key words: *Aggregate mixture, cement stabilizing, granulometric composition, strength grade, frost resistance.*

Савченко О.В.

Інститут державного управління та наукових досліджень з цивільного захисту

Ніжник В.В.

Інститут державного управління та наукових досліджень з цивільного захисту

Савченко Т.О.

Інститут державного управління та наукових досліджень з цивільного захисту

ПРОГРАМА ТА МЕТОДИКА ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ ВПЛИВУ СИСТЕМ ПРОТИПОЖЕЖНОГО ЗАХИСТУ НА ІНДИВІДУАЛЬНИЙ ПОЖЕЖНИЙ РИЗИК

Показані середні значення коефіцієнтів ймовірної ефективності спрацювання для систем протипожежного захисту, систем автоматичного пожежогасіння та одночасного функціонування систем протидимного захисту та спринклерних систем пожежогасіння, а також, що ймовірність ефективності спільної (одночасної) роботи системи протипожежного захисту може бути виражена добутком коефіцієнтів ймовірності ефективної роботи "і"-ї системи протипожежного захисту. Проведено аналіз основних досліджень і публікацій за обраною тематикою та сформульовано мету, задачі, об'єкт та предмет досліджень. В роботі наведені наукові результати, які лягли в основу програми та методики експериментальних досліджень впливу систем протипожежного захисту на індивідуальний пожежний ризик. За основу експериментальних досліджень покладено визначення часу досягнення критичних значень для життя людини небезпечними чинниками пожежі таких як температура та втрата видимості. При цьому, запропоновано під час досліджень використовувати висновки отримані за результатами розгляду двох можливих варіантів сценаріїв, перший коли системи протипожежного захисту відсутні, другий, коли наявні відповідні системи протипожежного захисту. Обґрунтований перелік обладнання для проведення експериментальних досліджень, а саме споруда ВБК-220, вогнище пожежі, засоби вимірювальної техніки, обладнання для проведення фото та відео зйомок та здійснено детальний опис із характеристиками кожного із зазначеного обладнання. Обґрунтовано перелік засобів вимірювальної техніки, необхідних для проведення експериментальних досліджень, зокрема для вимірювання таких небезпечних чинників пожежі, як температура (термопару типу ТХА) та втрата видимості (лазерний випромінювач та фоторезистор). Визначена необхідність у використанні в якості вогнищ пожежі як вогнища пожежі класу А (горіння твердих горючих матеріалів), так і вогнища пожежі класу В (горіння рідких горючих матеріалів). Встановлена послідовність проведення експериментальних досліджень та вимоги безпеки, яких необхідно дотримуватися під час експериментальних досліджень.

Ключові слова: пожежа, безпека, захист, ризик, системи протипожежного захисту, ефективність, функціонування, оцінювання ефективності.

Постановка проблеми. У роботі [1] обумовлена актуальність роботи щодо удосконалення системи протипожежного захисту та методології управління індивідуальним пожежним ризиком шляхом виявлення коефіцієнтів ефективності функціонування систем протипожежного захисту.

У роботі [2] шляхом теоретичних досліджень встановлено, що коефіцієнт ймовірної ефективності спрацювання систем протипожежного захисту можна виразити через відношення значення індивідуально-пожежного ризику для об'єкту не оснащеного системою протипожеж-

ного захисту до значення індивідуального пожежного ризику для об'єкту оснащеного відповідною системою протипожежного захисту. В цій же роботі встановлені середні значення коефіцієнтів ймовірної ефективності спрацювання для систем протипожежного захисту, систем автоматичного пожежогасіння та одночасного функціонування систем протидимного захисту та спринклерних систем пожежогасіння. Встановлено, що ймовірність ефективності спільної (одночасної) роботи системи протипожежного захисту може бути виражена добутком коефіцієнтів ймовірності

ефективної роботи "і"-ї системи протипожежного захисту.

Отримані результати теоретичних досліджень потребують перевірки шляхом порівняння їх із результатами відповідних експериментальних досліджень, що обумовлює актуальність цієї роботи.

Аналіз основних досліджень і публікацій. В літературних джерелах велика кількість як теоретичних так і експериментальних досліджень, які присвячені актуальній тематиці щодо показників надійності систем протипожежного захисту. Зокрема у роботі [3] встановлено, що перелік параметрів, які характеризують вплив систем протипожежного захисту на значення індивідуального пожежного ризику є без відповідності та ефективності функціонування систем протипожежного захисту. При цьому, встановлено, що зазначені параметри можна виразити через тривалість настання граничних значень для життя людини небезпечними чинниками пожежі. В роботі [4,5,6] визначено, що небезпечним чинником пожежі, який по часу в умовах пожежі, найшвидше досягає для людини критичних значень згідно із [7] є віра та видимості тому його доцільно реалізувати в експериментальних дослідженнях. Оскільки в умовах пожежі важливим небезпечним чинником пожежі є підвищення температури до критичних значень згідно із [7] цей небезпечний чинник пожежі також слід реалізувати під час експериментальних досліджень.

У роботах [8,9,10] встановлено, що для дослідження температуру ефективно використовувати термомпари типу ТХ4 із вимірювально-обчислювальним комплексом «Темоконт». У роботі [11,12] встановлено, що для дослідження задимленості приміщення в умовах пожежі (втрата видимості) ефективно використовувати лазерний випромінювач d6 мм Н4А3 із фоторезистором GL 55165 – 10 КОМ.

У роботах [13, 14] встановлено перелік систем протипожежного захисту, які мають вплив на значення індивідуального пожежного ризику та обґрунтовані сценарії розвитку пожеж, які доцільно використати під час проведення експериментальних досліджень.

Постановка завдання. Метою даної роботи є обґрунтувати положення та розробити програму та методику експериментальних досліджень впливу систем протипожежного захисту на індивідуальний пожежний ризик. Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі задачі:

– провести аналіз останніх досліджень і публікацій за визначеною метою досліджень;

– встановити перелік обладнання для проведення експериментальних досліджень;

– визначити перелік засобів вимірювальної техніки для проведення експериментальних досліджень;

– встановити етапи та послідовність експериментальних досліджень;

– визначити вимоги до проведення експериментальних досліджень.

Об'єкт дослідження – функціонування систем протипожежного захисту в умовах пожежі.

Предмет дослідження – вплив ефективності спрацювання систем протипожежного захисту на наслідки від пожежі.

Виклад основного матеріалу. Обладнання для досліджень

Обладнання для проведення експериментальних досліджень включає: споруда ВБК-220, вогнище пожежі, засоби вимірювальної техніки, обладнання для проведення фото та відео зйомок.

Споруда ВБК-220 являє собою одноповерхову споруду розмірами в плані 5950 мм x 5970 мм x 6030 мм. Площа підлоги споруди ВБК-220 становить 35,7 м². Об'єм споруди з урахуванням об'єму ніш 221,4 м³. Споруда ВБК-220 оснащена дверними та віконними прорізами розмірами: дверний проріз ширина 3,012 м, висота 2,855 м, площа перерізу 8,599 м², віконний проріз ширина 1,73 м, висота 1,73 м, площа перерізу 2,99 м².

Також споруда ВБК-220 оснащена прорізами у покритті, які доцільно використати, в якості системи природного протидимного захисту.

В якості пожежної навантаги (по черзі) слід розглянути навантагу із твердими горючими речовинами (вогнище пожежі класу А) та навантагу із горючими рідинами (вогнище пожежі класу В).

В якості вогнища пожежі класу А використовуємо модельне вогнище пожежі. Модельне вогнище пожежі класу А – це штабелі, складені з дерев'яних брусків, встановлені на металеву опору висотою 250 мм і шириною 900 мм, довжина якої дорівнює довжині модельного вогнища пожежі. Металеву опору потрібно виготовляти з кутиків з розмірами (довжина × ширина) (50 × 50) мм згідно з [15].

Для досліджень використовуємо модельне вогнище пожежі класу 13А [16]. Дерев'яні бруски мають виготовлятися з деревини вологістю від 10 % до 15 % за масою. Вологість деревини вимірюються за допомогою електровологоміра. Вони мають бути розпиляні з таким розрахунком, щоб довжина сторони їх квадратного поперечного

перерізу дорівнювала (39 ± 2) мм. Густина деревини має складати від $0,40 \text{ кг/дм}^3$ до $0,65 \text{ кг/дм}^3$.

Дерев'яні бруски потрібно укладати в чотирнадцять шарів на металеву опору.

Бруски кожного шару мають укладатися із забезпеченням однакових проміжків з таким розрахунком, щоб відстань між брусками становила 6 мм.

Бруски, укладені в поперечному напрямку (2-й, 4-й, 6-й, 8-й, 10-й, 12-й і 14-й шари) мають бути однакової довжини (500 ± 10) мм.

Бруски, укладені в повздовжньому напрямку (1-й, 3-й, 5-й, 7-й, 9-й, 11-й і 13-й шари) мають бути однакової довжини (1300 ± 10) мм.

Для розпалювання вогнища пожежі класу 13 А використовуємо металеве деко розмірами ширина 600 мм, висота 10 мм та довжиною 1400 мм. Для розпалення використовуємо бензин у кількості 1,1 л. Деко розташовуємо на підлозі симетрично під вогнищем пожежі класу 13 А. Дно деко покриваємо шаром води висотою 30 мм.

В якості вогнища пожежі класу В використовуємо модельне вогнище пожежі класу 21В, що представляє собою металеве деко внутрішнім діаметром на рівні верхнього краю борта 920 ± 10 мм, висотою борта 150 ± 5 мм та товщиною стінки борта 2 ± 0 мм, у яке заливають 21 л рідини (1/3 вода 7 л та 2/3 пальне 14 л).

Штабель повинен розташовуватись симетрично відносно центру випробувального боксу.

Під час проведення експериментальних досліджень вимірюємо температуру та задимлення в об'ємі споруди ВБК-220.

Для вимірювання температури в споруді ВБК-220 на висоті 1,7 м від підлоги встановлюємо

термопари. В споруді ВБК-220 слід встановити не менше чотирьох термопар в кожному кутку споруди ВБК-220 та дві термопари посередині довгих боків боксу на відстані 0,5 м від огорожувальних стін.

Для вимірювання задимлення у споруді ВБК-220 на відстані 1,7 м від підлоги з одного боку довшої сторони споруди встановлюємо лазерний випромінювач з іншого боку довшої сторони споруди приймач лазерного випромінювача. Лазерний випромінювач та приймач встановлюємо таким чином, щоб промінь лазерного випромінювача утворював перпендикуляр по відношенню осі вхідних воріт у споруду ВБК-220.

Схематичне улаштування засобів вимірювальної техніки зображено на рисунку 1.

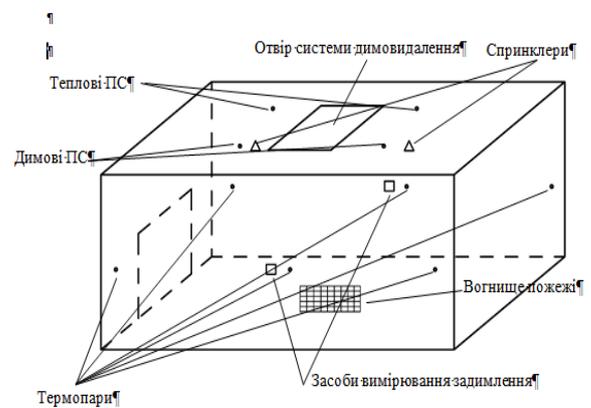


Рис. 1. Схематичне улаштування ЗВТ

Дослідження проводяться не менше трьох разів для кожного етапу експериментального дослідження визначено із послідовністю у таблиці 1.

Технічні характеристики обладнання для досліджень

| № п/п | Найменування обладнання для досліджень | Характеристика | Значення характеристики | Одиниці вимірювання | Похибка |
|-------|--|--------------------------|-------------------------------|-------------------------|--|
| 1 | Лазерний випромінювач d 6 мм Н4А3 | потужність | 5 | мВт | $\pm 0,01 \%$ |
| 2 | Фоторезистр GL 5516 5-10 КОМ | потужність | 5 | мВт | $\pm 0,01 \%$ |
| 3 | Термопари | Температура | $-40 \div 1350$ | $^{\circ}\text{C}$ | $\pm 2,5 \%$ |
| 4 | Вимірювально-обчислювальна система «Термоконт» | Температура | $0 \div 1200$ | $^{\circ}\text{C}$ | $\pm 0,6 \%$ |
| 5 | Блок регулятор | Сила струму | 30 | А | |
| 6 | Вологомір для деревини ВПК-12 | Вологість | $6 \div 100$ | % | $\pm 2 \%$ |
| 7 | Рулетка Р10 УЗК | Метр | $0 \div 10$ | м | 2 кл. точн. |
| 8 | Психрометр аспіраційний МВ-4М | Температура Вологість | $-10 \div 50$ $6 \div 100$ | $^{\circ}\text{C}$ % | $\pm 0,2 \%$ $\pm 4 \%$ |
| 9 | Барометр-анероїд М67 | Тиск | $600 \div 800$ | мм.рт.ст. | ± 1 мм.рт.ст. |
| 10 | Анемометр крильчастий АСО-3 | Швидкість | $0,3 \div 5$ | м/с | $\pm 1 (0,1 + 0,05V_{\text{вим}})$ м/с |

Таблиця 1
Послідовність проведення експериментальних досліджень

| № з/п | Етап експериментального дослідження | Сценарій експериментального дослідження |
|-------|-------------------------------------|--|
| 1. | 1.1 А | Споруда ВБК-220 не оснащена системами протипожежного захисту |
| | 1.2 В | |
| 2. | 2.1 А | Споруда ВБК-220 оснащена автоматичною системою пожежної сигналізації |
| | 2.2 В | |
| 3. | 3.1 А | Споруда ВБК-220 оснащена системою протипожежного захисту |
| | 3.2 В | |
| 4. | 4.1 А | Споруда ВБК-220 оснащена автоматичною системою пожежогасіння |

1. Готуються та встановлюються згідно із схемою рисунок 1 вогнище пожежі та засоби вимірювальної техніки.

2. Підготовка випробувального боксу.

2.1. Споруда ВБК – 220 не оснащена системою протипожежного захисту: всі отвори випробувального боксу зачиняються.

2.2. Споруда ВБК – 220 оснащується автоматичною системою пожежної сигналізації: всі отвори випробувального боксу зачиняються, на стелі випробувального боксу монтуються два пожежні сповіщувачі димові та два пожежні сповіщувачі теплові згідно із рисунком 1. Сигнали від пожежних сповіщувачів виводяться на пульт пожежний.

2.3. Споруда ВБК – 220 оснащується системою протидимного захисту: всі отвори випробувального боксу зачиняються, окрім отвору, який розташований у покритті випробувального боксу.

2.4. Споруда ВБК – 220 оснащується автоматичною системою пожежогасіння: всі отвори випробувального боксу зачиняються на стелі випробувального боксу встановлюються спринклерні зрошувачі згідно із схемою рисунок 1, які підключені до пожежного насосу та пожежного резервуару.

3. Термопары з'єднуються із інформаційно-вимірювальною системою «Термоконт», а лазерні приймачі із і перевіряється їх працездатність.

4. Готується обладнання для проведення фото-та відео зйомок.

5. Готуються первинні засоби пожежогасіння.

1. Проводиться вимірювання і реєстрація параметрів зовнішнього середовища, а саме: температури повітря, швидкості вітру, вологості повітря, атмосферного тиску.

2. Проводиться вимірювання і реєстрація початкових значень температур за показниками усіх термопар та лазерного приймача.

3. Вмикаються вимірювально-обчислювальні пристрої у режим реєстрації, включається відеозйомка та підпалюється вогнище пожежі.

4. Під час проведення досліджень інформаційно-вимірювальною системою вимірюють та реєструють значення температур та задимленість.

5. Реєстрацію даних вимірювання проводимо з інтервалом не більше, ніж 10 с.

6. Для сценарію досліджень коли споруда ВБК – 220 оснащена АСПС фіксація даних термопар і лазерного приймача проводиться в момент спрацювання АСПС.

7. Дослідження тривають до моменту досягнення температури хоча б на одній термопарі 60°C або 15 ДБ на лазерному приймачі або до повного вигорання вогнища пожежі.

За результатами досліджень для кожного моменту часу t_j вимірювання визначають температуру Q_j на відповідній термопарі покази лазерного випромінювача (q_j). Експериментальні дані заносяться до журналу.

За отриманими даними визначається похибка досліджень за формулою

$$\Delta A = \pm k \sqrt{(\Delta A_1)^2 + (\Delta A_2)^2} \quad (1)$$

де ΔA – абсолютна похибка досліджуваних величин;

ΔA_1 – похибка датчиків (термопар, датчика теплового потоку, інструментальна);

ΔA_2 – похибка вимірювальних пристроїв (вимірювально-обчислювальна система «Термоконт», пристрій для вимірювання теплового потоку, похибка зняття результатів для вимірювання розмірів (зазвичай дорівнює половині ціни поділки засобів вимірювань));

k – коефіцієнт, який залежить від імовірності ($k=1,1$ пр $P=0,95$).

Визначаються середні значення температур та задимленості. У графічній формі будуються залежності температур, задимленості. За результатами експериментальних досліджень встановлюється час досягнення у випробувальному боксі критичних значень температури (60°C) та задимленості (15 ДБ) для різних сценаріїв експериментального дослідження.

Під час проведення досліджень слід керуватись вимогами, інструкціями ІДУ НД ЦЗ, якими встановлено вимоги з безпеки праці безпосередньо на робочому місці, іншими нормативними документами з безпеки праці.

Серед персоналу, що проводить дослідження, повинна бути особа, яка відповідає за охорону праці. До проведення досліджень мають допускатися особи, які пройшли загальний інструктаж з охорони праці, ознайомились з порядком проведення досліджень, отримали інструктаж з уточненням функцій кожного учасника досліджень.

До проведення досліджень необхідно визначити та огородити тимчасовою огорожею небезпечну в яку стороннім особам входити заборонено.

До проведення досліджень необхідно забезпечити наявність засобів пожежогасіння у кількості достатньому для гасіння вогнища пожежі класу 55В.

Під час проведення досліджень оператор має бути екіпірований захисним одягом пожежника, пожежною каскою та поясом, захисними рукавицями та взуттям.

Місце проведення досліджень забезпечують одним переносними водними вогнегасниками ВВ-5 та одним переносним порошковим вогнегасником ВП-5.

Висновки. В роботі вирішено актуальну науково-технічну задачу щодо обґрунтування положень та розробки програми і методики експериментальних досліджень впливу систем протипожежного захисту на значення індивідуаль-

ного пожежного ризику, за результатами чого зроблені такі висновки:

1. Під час експериментальних досліджень впливу систем протипожежного захисту на індивідуальний пожежний ризик достатньо оцінювати два із небезпечних чинників пожежі: критична температура та витрати видимості.

2. Під час експериментальних досліджень необхідно розробити різні сценарії можливого розвитку пожежі без систем протипожежного захисту та по черзі із відповідними системами протипожежного захисту.

3. Встановлено, що для вимірювання температури доцільно використовувати термопари ТХА із вимірювальним пристроєм «Термокопт» а для вимірювання втрати видимості лазерний вимірювач d6 мм Н4А3 із фотрорезистором GL5516 5-10 КОМ.

4. Обґрунтовано положення та розроблено програму та методику експериментальних досліджень впливу систем протипожежного захисту на значення індивідуально-пожежного ризику.

Подальші дослідження будуть спрямовані для виявлення закономірності впливу систем протипожежного захисту на розрахункові параметри індивідуально-пожежного ризику шляхом проведення експериментальних досліджень.

Список літератури:

1. В.В. Ніжник, О.В. Савченко, Д.О. Добряк, Н.В. Кравченко Аналіз сучасного стану щодо управління індивідуальним пожежним ризиком із використанням систем протипожежного захисту. *Вчені записки таврійського національного університету імені В.І. Вернадського Серія: Технічні науки*, 2022. Т. 33 (72) № 1, С. 328–334.
2. Vadim Nizhnyk, Olesya Savchenko, Yaroslav Ballo & Valeria Nekora Theoretical Approaches to Justify the Coefficients of Influence of Fire Protection Systems on Individual Fire Risk. International Scientific Conference EcoComfort and Current Issues of Civil Engineering EcoComfort 2022. Proceedings of EcoComfort 2022 pp. 299–306 DOI: 10.1007/978-3-031-14141-6_30.
3. Звіт про науково-дослідну роботу Обґрунтування впливу систем протипожежного захисту під час реалізації ризик-орієнтовного підходу у профілактичній діяльності підрозділів ДСНС України. Київ : ІДУ НД ЦЗ, 2022. 422 с.
4. Ніжник В.В. Запобігання надзвичайним ситуаціям, що обумовлені загораннями і пожежами на об'єктах критичної інфраструктури / М.Г. Шкарабура, І.Г. Маладика, С.В. Жартовський, В.В. Ніжник // Матеріали Всеукраїнської науково-практичної конференції з міжнародною участю «Надзвичайні ситуації: безпека та захист». – Черкаси. – 2015. – С. 178–180.
5. Дишкант О.В., Дивень В.І., Доценко О.Г., Савченко О.В. Чинники, які впливають на швидкість евакуації ХХІІ-ий том міжнародної колективної монографії "MODERNÍ ASPEKTY VĚDY" ("Сучасні аспекти науки"), Київ: 2022. – С. 516–526.
6. М. В. Білошицький, Н. В. Кравченко, О. М. Тесленко, Д. О. Добряк, С. З. Цимбалістий Деякі питання токсичної дії продуктів горіння на людину ІХ Всеукраїнська науково-практична конференція з міжнародною участю «Надзвичайні ситуації: безпека та захист», НУЦЗУ ЧПБ ім. Героїв Чорнобиля: 2019. С. 19–24.
7. ДСТУ 8828:2019 Пожежна безпека. Загальні положення. [Чинний від 27.02.2019]. – К.: ДП «УкрНДНЦ», 2019, 87 с. – (Національний стандарт України).
8. Ніжник В.В. Аналіз теоретичних та експериментальних методів досліджень теплопередачі між будинками та спорудами під час пожежі / *Міжнародний науковий журнал "Інтернаука"*. – 2019. – Вып. № 3 (65)/2019. – С. 86–92.

9. Konig J. and Walleig L. Timber frame assemblies exposed to standard and parametric fires. Part 2: A design model for standard fire expose// Tratek, Rapport I 0001001.-Stocholm.–June 2000.
10. Ya Ballo, R Yakovchuk, V Nizhnyk, O Sizikov, A Kuzyk, Investigation of design parameters facade fire-preventing eaves for prevent the spread of fires on facade structures of high-rise buildings Fire Safety, №37, (2020)16-23.
11. Звіт про науково-дослідну роботу Провести дослідження ефективності застосування протипожежних водяних завіс для створення перешкоди поширенню пожежі між будинками та в будинках. Київ : ІДУ НД ЦЗ, 2023. 202 с.
12. Присяжнюк В.В. Підвищення ефективності гасіння пожеж з використанням переносного засобу димо- та тепловидалення: дисертація канд. техн. наук: спец. 21.06.02. Львів, 2024. 198 с.
13. В.В. Ніжник, О.В. Савченко, Д.О. Добряк Критерії для дослідження впливу систем протипожежного захисту на індивідуальний пожежний ризик. *Науковий журнал «Вчені записки таврійського національного університету імені В.І. Вернадського Серія: Технічні науки»*, Том 34 (73) № 1. Київ: 2023. – С. 336–341.
14. О.О. Сізіков, В.В. Ніжник, Я.В. Балло, С.Ю. Голікова, О.В. Савченко Систематизація процесу управління пожежною безпекою об'єкта захисту. *Науковий збірник «Науковий вісник: Цивільний захист та пожежна безпека»*, № 2 (8). Київ: 2019. – С. 41–49.
15. ISO 657-1:1989 Hot-rolled steel sections. Part 1: Equal-leg angles. Dimensions [Електронний ресурс. Режим доступу]: <https://www.iso.org/ru/standard/4791.html>.
16. ДСТУ EN 3-7:2014 Вогнегасники переносні. Частина 7. Характеристики, вимоги до робочих параметрів і методи випробування (EN 3-7:2014+A1:2007, IDT). [Чинний від 01.09.2021]. – К.: ДП «УкрНДНЦ», 2014, 34 с. – (Національний стандарт України).

Savchenko O.V., Nizhnyk V.V., Savchenko T.O. PROGRAM AND METHOD OF EXPERIMENTAL RESEARCH OF THE INFLUENCE OF FIRE PROTECTION SYSTEMS ON INDIVIDUAL FIRE RISK

The average values of the coefficients of the probable effectiveness of the activation of the fire protection system, the automatic fire protection system and the simultaneous operation of the smoke protection system and fire extinguishing sprinkler systems are shown, as well as the fact that the probability of the effectiveness of the joint (simultaneous) operation of the fire protection system can be expressed as the product of the coefficients of the probability of effective operation "and" fire protection systems. An analysis of the main researches and publications on the selected topic was carried out and the purpose, tasks, object and subject of research were formulated. The paper presents the scientific results that formed the basis of the program and methods of experimental studies of the influence of fire protection systems on individual fire risk. The basis of experimental research is the determination of the time of reaching critical values for human life by dangerous fire factors such as temperature and loss of visibility. At the same time, during the research, it is proposed to use the conclusions obtained from the results of consideration of two possible scenarios, the first when there are no fire protection systems, the second when there are appropriate fire protection systems. A substantiated list of equipment for conducting experimental research, namely the VBK-220 building, a fire source, measuring equipment, equipment for photo and video shooting, and a detailed description with the characteristics of each of the specified equipment. The list of measuring equipment necessary for conducting experimental research is substantiated, in particular for measuring such dangerous fire factors as temperature (thermocouples of the TXA type) and loss of visibility (laser emitter and photoresistor). The need to use both class A fires (burning solid combustible materials) and class B fires (burning liquid combustible materials) as fire sources has been determined. The sequence of conducting experimental studies and safety requirements, which must be observed during experimental studies, are established.

Key words: fire, safety, protection, risk, fire protection systems, efficiency, functioning, performance evaluation.

ГЕОДЕЗІЯ

УДК 332.6

DOI <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2024.4/55>

Пілічева М.О.

Харківський національний автомобільно-дорожній університет

ІСНУЮЧІ ПІДХОДИ ДО ЦІНОУТВОРЕННЯ У СФЕРІ ЗЕМЛЕУСТРОЮ

У статті розглянуто основні підходи до формування кошторисної вартості землевпорядних робіт. При формуванні кошторисів на розробку землевпорядної документації враховується вартість таких робіт, як: консультаційні послуги, збір вихідної інформації, підготовка матеріалів для отримання дозволу на розробку землевпорядної документації, топографо-геодезичні та картографічні роботи, землевпорядні вишукування, формування пояснювальної записки та електронного документа, матеріали погоджень землевпорядної документації, внесення відомостей до Державного земельного кадастру, інші накладні витрати підприємства (амортизація геодезичного обладнання, ліцензійне програмне забезпечення, оренда офісного приміщення тощо). Визначено відсутність чітких нормативів, затверджених на законодавчому рівні, що сприяє виникненню конфліктів, непорозумінь та розбіжностей у трактуванні вартості робіт між замовниками та розробниками землевпорядної документації. Виявлено основні фактори, що впливають на формування кошторису виконання землевпорядних робіт, до яких відносяться особливості місцевості, економічні та функціональні особливості. Визначено відсотковий внесок компонентів виконання землевпорядних робіт під час розробки землевпорядної документації. Більша частина кошторису припадає на оплату праці інженера-землевпорядника 75,89%, а найменший відсоток вартості включає в себе організаційно-ліквідаційні витрати – 0,75%. Людино-часові витрати при розрахунку кошторису в землевпорядкуванні являються ключовими для визначення обсягу роботи та ресурсів, необхідних для виконання завдань у встановлені терміни, виявлення неефективних етапів роботи та підвищення якості виконання завдань, впровадження сучасних методів та технологій для зниження трудомісткості робіт. В кошторисі на виконання землевпорядних робіт обов'язково враховується амортизація матеріальних (геодезичні прилади, офісне обладнання) та нематеріальних активів (спеціалізоване програмне забезпечення, ліцензії та патенти). Вибір методу розрахунку амортизаційних витрат залежить від фінансової стратегії підприємства та специфіки використання основних засобів.

Ключові слова: землевпорядні роботи, землевпорядна документація, вартість, кошторис, фактори ціноутворення, амортизаційні витрати.

Постановка проблеми. Оцінка вартості будь-якого проекту є ключовим етапом його планування, управління та виконання. Точність кошторису має вирішальне значення не тільки для оцінки економічної ефективності проекту, але й для планування ефективних капітальних інвестицій та фінансування. Під час розробки кошторису використовуються креслення, технічні специфікації, описи та нормативні документи, де визначаються передбачувані витрати, пов'язані з проведенням геодезичних та землевпорядних робіт, та певний рівень прибутку. Показники розрахункової вартості допомагають оцінити різні варіанти проектування і вибрати найбільш економічно ефективний [1]. На основі кошторисів і календарних планів формуються бюджети про-

ектів, які є основою для обліку, звітності та оцінки діяльності як для замовника, так і для розробника.

При формуванні кошторисів на розробку землевпорядної документації враховується вартість таких робіт, як: консультаційні послуги, збір вихідної інформації, підготовка матеріалів для отримання дозволу на розробку землевпорядної документації, топографо-геодезичні та картографічні роботи, землевпорядні вишукування, формування пояснювальної записки та електронного документа, матеріали погоджень землевпорядної документації, внесення відомостей до Державного земельного кадастру, інші накладні витрати підприємства (амортизація геодезичного обладнання, ліцензійне програмне забезпечення, оренда офісного приміщення тощо).

При нормуванні вартості землевпорядних робіт в Україні в різні періоди використовувалися різні нормативно-правові документи, а саме: ДСТУ Б Д.1.1-7:2013 Правила визначення вартості проектно-вишукувальних робіт та експертизи проектно-документації на будівництво [2] (втрата чинності січень 2014 р.), Збірник укрупнених кошторисних розцінок на топографо-геодезичні та картографічні роботи [3] (втрата чинності липень 2015 р.) тощо. Але вони втратили чинність, тому наразі в Україні відсутні чинні нормативи щодо визначення вартості землевпорядних робіт, які були б загальновизнаними та широко застосовувалися. Така ситуація ускладнює планування та оцінку витрат на землевпорядні роботи та сприяє виникненню конфліктів між зацікавленими сторонами, тому актуальною задачею є дослідження основних підходів до формування кошторисної вартості робіт із землеустрою.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Проблематикою ціноутворення займалися такі науковці, як Михалків А.А., Косташ Т.В., Починок М., Губарь О.В., Ларка Л.С., Павленко В.В., Руденко І.В., Мельничук М.О., Кунічева Т.П. та інші [4, 5]. В науковій праці [4] авторами підкреслено необхідність проведення постійного моніторингу ситуації на ринку та застосування нових маркетингових підходів в ціноутворенні у зв'язку з швидкоплинними змінами в економіці України, а саме: значні темпи інфляції та постійні коливання цін на товари та послуги. Визначена необхідність приділяти увагу прийняттю цінових рішень, що базуються на врахуванні витрат суб'єктів господарювання, а також вивчення природи та характеру витрат.

Авторами наукової праці [6] визначені проблемні питання законодавства формування і державного регулювання цінової політики, особливе

значення при цьому приділяється обґрунтуванню вартості землевпорядних робіт, яка б була ринковою і конкурентоспроможною, тобто влаштувала як замовника та виконавця.

Постановка завдання. Метою статті є дослідження підходів до формування кошторисної вартості робіт із землеустрою в сучасних умовах ринкової економіки.

Виклад основного матеріалу. Сьогодні ціни на послуги в сфері землеустрою встановлюються підприємствами самостійно, при цьому можна виділити 3 основні групи факторів, які впливають на ціноутворення вартості землевпорядних послуг (рис. 1).

Перша група факторів – особливості місцевості – включає в себе наступні показники: рельєф місцевості, площа земельної ділянки, її цільове призначення та наявність забудови.

Вимірювання на складній місцевості (наявність ярів, балок, боліт, водних об'єктів, пересеченого рельєфу, щільної забудови) потребують залучення більшої кількості фахівців, різного виду обладнання та комбінованих методів проведення робіт, що призводить до збільшення часу та вартості землевпорядних робіт.

Площа та цільове призначення земельної ділянки є не менш важливим фактором при ціноутворенні вартості землевпорядних робіт. Більша площа ділянки зазвичай потребує більше часу та ресурсів для проведення знімань, тому і вартість робіт також буде більша. В залежності від цільового призначення земельної ділянки визначається об'єм та точність робіт. Наприклад, для житлової забудови зазвичай необхідно більш детальна геодезична зйомка, щоб визначити межі ділянки, розташування будівель та інших об'єктів. Це може призвести до збільшення вартості робіт.

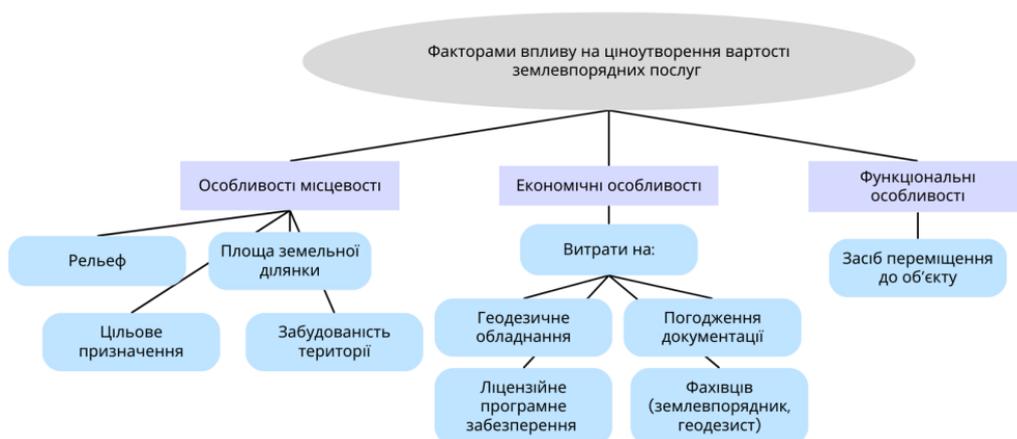


Рис. 1. Фактори впливу на ціноутворення вартості землевпорядних послуг

Друга група факторів – економічні особливості – визначається витратами на геодезичне обладнання, ліцензійне програмне забезпечення, погодження земельпорядної документації та оплату праці фахівців.

Вид та вартість обладнання безпосередньо впливають на загальну суму проведення геодезичних робіт. Більш точне обладнання забезпечує високу точність вимірювань, дозволяє отримувати детальні дані про місцевість та як правило має вищу вартість.

Витрати на ліцензійні програмні забезпечення дійсно можуть впливати на вартість геодезичних робіт. Використання дорогих ліцензійних програмних продуктів може призвести до збільшення загальної вартості геодезичних робіт. Існують безкоштовні або недорогі програмні продукти, які можуть виконувати багато з тих самих функцій, що й дорогі ліцензійні програми. Використання таких програмних продуктів може допомогти знизити загальну вартість земельпорядних робіт. Багато програмних продуктів потребують регулярного оновлення, яке може бути платним, що додає витрат протягом терміну служби програмного забезпечення.

Витрати на погодження земельпорядної документації цей процес часто є складним та тривалим і чим довше процес затвердження іде, тим більше часу та ресурсів буде потрібно витратити на його виконання. У деяких випадках для погодження земельпорядної документації можуть знадобитися додаткові послуги, такі як юридичний супровід або експертиза. За подання земельпорядної документації на погодження зазвичай стягуються державні збори, які в залежності від об'єкта можуть бути різними. Також на земельній ділянці можливі накладання штрафів з різних законодавчо обґрунтованих причин, через що неможливо одразу погодити документацію і треба робити повторно ті ж самі процедури затвердження та знов сплачувати усі необхідні комісії. Це також може призвести до збільшення вартості робіт.

Третя група факторів – функціональні особливості – включає в себе віддаленість знаходження компанії до місця проведення робіт, що впливає на наступні вартість геодезичних робіт, термін виконання, якість робіт та зручність для замовника.

Чим більша відстань, тим вищі транспортні витрати, які включають витрати на паливе, амортизацію транспортного засобу, проживання та харчування земельпорядників. Чим більша відстань, тим більше часу буде потрібно виконавцям, щоб дістатися до місця проведення робіт. У несприятливих погодних умовах подорож може бути

ускладнена або неможлива. Це може призвести до затримки виконання робіт.

Землевпорядники, які знайомі з місцевістю, де буде проводитися роботи, можуть краще розуміти особливості рельєфу та інші фактори, які можуть вплинути на точність робіт. Зручність для замовника проявляється в спілкуванні з земельпорядником, який знаходиться далеко, може бути складнішим. Це може призвести до непорозумінь та затримок у роботі.

Людино-часові витрати та заробітна плата є основними компонентами економічного аналізу праці та тісно взаємопов'язані між собою. Для підприємств важливо оптимізувати людино-часові витрати, щоб забезпечити конкурентоспроможність та фінансову стабільність. Це можна досягти за допомогою автоматизації процесів, покращення умов праці, підвищення кваліфікації працівників та впровадження інновацій. Існує декілька способів оптимізації людино-часових витрат, наприклад:

- Впровадження автоматизованих систем та технологій може значно зменшити час, необхідний для виконання рутинних завдань.

- Інвестиції в навчання та розвиток персоналу сприяють підвищенню їхньої продуктивності.

- Аналіз та реорганізація робочих процесів можуть допомогти виявити та усунути неефективні етапи роботи.

- Створення сприятливих умов праці та запровадження систем мотивації, таких як премії за перевиконання плану або винагороди за якість роботи, сприяють підвищенню продуктивності працівників.

Опрацювавши декілька однотипних проєктів, площа яких складала від 0,1 до 0,2 га, було враховано відсоткове співвідношення кожної задіяної особи без якої виконання поставленої задачі не можливе (табл. 1). Велика частина результату залежить від земельпорядника та його кваліфікації – це 75,89%, а найменший відсоток в організаційно-ліквідаційні витратах – 0,75%.

Таблиця 1
Відсотковий внесок у реалізацію
одного земельпорядного проєкту

| № | Компоненти виконання земельпорядних робіт | % вкладу |
|---|---|----------|
| 1 | Геодезичні роботи | 12,47 |
| 2 | Землевпорядні роботи | 75,89 |
| 3 | Витрати на транспорт | 1,40 |
| 4 | Метрологічне забезпечення та амортизаційні відрахування | 4,49 |
| 5 | Організаційно-ліквідаційні витрати | 0,75 |
| 6 | Податки | 5,00 |
| | Всього | 100 |

Людино-часові витрати у землевпорядкуванні відображають час, необхідний для виконання різних завдань, таких як кадастрові зйомки, підготовка документації, проведення геодезичних робіт, оцінка земельних ділянок та розробка проєктів землеустрою. Цей показник є ключовим для:

- Визначення обсягу роботи та ресурсів, необхідних для виконання завдань у встановлені терміни.
- Розрахунку вартості виконання робіт та підготовка кошторисів.
- Виявлення неефективних етапів роботи та підвищення якості виконання завдань.
- Впровадження сучасних методів та технологій для зниження трудомісткості робіт.

Також у сфері землевпорядкуванні є свої особливості у людино-часових витратах, через свою специфічну та не повсякденну роботу, на відміну від фахівців працюючих в офісі, є такі важливі чинники:

- Роботи у сфері землевпорядкування включають різноманітні завдання, від польових досліджень до аналітичної обробки даних. Кожен етап вимагає певних навичок та знань, що впливає на тривалість виконання робіт.

- Землевпорядкувальні роботи потребують високої точності, оскільки від цього залежить правильність оформлення земельних ділянок, юридична чистота документів та подальше використання земельних ресурсів.

- Роботи на місцевості можуть залежати від погодних умов, доступності території, наявності необхідного обладнання та інших факторів, що впливають на людино-часові витрати.

Оптимізація людино-часових витрат у сфері землевпорядкування має значний вплив на економіку та суспільство. Зниження витрат на виконання робіт сприяє зменшенню вартості проєктів, що робить їх більш доступними для широкого кола клієнтів. Крім того, підвищення ефективності використання земельних ресурсів сприяє сталому розвитку, охороні навколишнього середовища та підвищенню якості життя населення.

Амортизаційні витрати є важливою складовою витрат будь-якого підприємства, яке займається землеустроєм. У процесі виконання землевпорядних робіт використовується значна кількість спеціалізованої техніки, обладнання та інструментів, вартість яких з часом знижується через фізичне зношування та моральне старіння. Цей процес і є основою амортизаційних розходів, які необхідно враховувати для правильного обліку фінансових витрат підприємства.

Особливості амортизаційних витрат у землевпорядних роботах:

- Для виконання землевпорядних робіт використовуються різні типи техніки та обладнання, зокрема тахеометри, нівеліри, GPS-обладнання, дрони тощо. Вартість цих засобів може бути

значною, що впливає на розмір амортизаційних витрат.

- Амортизаційні витрати залежать від строку корисного використання кожного основного засобу. Для землевпорядної техніки цей строк може коливатися від 10 років до 15 років, залежно від інтенсивності використання та умов експлуатації.

- Існують різні методи нарахування амортизації, такі як лінійний метод, метод зменшеного залишку, метод виробничих витрат та інші. Вибір методу залежить від фінансової стратегії підприємства та специфіки використання основних засобів.

- Під час експлуатації землевпорядної техніки виникають витрати на її ремонт та технічне обслуговування. Ці витрати можуть бути враховані в амортизаційних розрахунках як частина загальних витрат на утримання основних засобів.

Для правильного обліку амортизаційних витрат необхідно вести детальний реєстр основних засобів, що включає інформацію про їх вартість, дату введення в експлуатацію, строк корисного використання та метод амортизації. Це дозволяє точно визначити суму амортизаційних відрахувань, які повинні бути віднесені на витрати підприємства.

Існує кілька основних методів нарахування амортизації: лінійний метод, метод зменшеного залишку, метод нарахування амортизації за одиницю продукції та інші. Найпоширенішим є лінійний метод, який передбачає рівномірне розподілення вартості обладнання протягом усього строку його служби. Для більш інтенсивно використовуваних засобів може бути застосований метод зменшеного залишку, що дозволяє швидше списувати вартість у перші роки експлуатації [7].

Крім матеріальних основних засобів, у землевпорядних роботах використовуються й нематеріальні активи, такі як програмне забезпечення, ліцензії та патенти. Вартість цих активів також підлягає амортизації, що повинно враховуватись у фінансовому обліку.

Висновки. У даному дослідженні визначено основні підходи до формування кошторисної вартості землевпорядних робіт, а саме:

1. Відсутність чітких нормативів, затверджених на законодавчому рівні, може також сприяти виникненню конфліктів між замовниками та розробниками землевпорядної документації. Без чітких і однозначних стандартів існує ризик непорозуміння та розбіжностей у трактуванні вартості робіт, що може вплинути на якість виконаних робіт.

2. Проведено аналіз ринкових показників вартості землевпорядних послуг. Виявлено основні фактори, що впливають на формування ціни, включаючи економічні умови, складність проєкту, регіональні особливості та інші змінні.

3. Визначено відсотковий внесок компонентів виконання землевпорядних робіт під час розробки

землевпорядної документації. Більша частина кошторису припадає на оплату праці інженера-землевпорядника 75,89%, а найменший відсоток вартості включає в себе організаційно-ліквідаційні витрати – 0,75%.

4. Людино-часові витрати при розрахунку кошторису в землевпорядкуванні являються ключовими для визначення обсягу роботи та ресурсів, необхідних для виконання завдань у встановлені терміни, виявлення неефективних етапів роботи та підвищення якості виконання завдань, впрова-

дження сучасних методів та технологій для зниження трудомісткості робіт.

5. В кошторисі на виконання землевпорядних робіт обов'язково враховується амортизація матеріальних (геодезичні прилади, офісне обладнання) та нематеріальних активів (спеціалізоване програмне забезпечення, ліцензії та патенти). Вибір методу розрахунку амортизаційних витрат залежить від фінансової стратегії підприємства та специфіки використання основних засобів.

Список літератури:

1. Федірець О.В., Савченко М.А., Заїка В.М. Управління земельними ресурсами як чинник їх ефективного використання. *Приазовський економічний вісник*. 2019. № 1(12). С. 148–152.
2. ДСТУ Б Д.1.1-7:2013 Правила визначення вартості проектно-вишукувальних робіт та експертизи проектною документацією на будівництво. URL: [https://kyivaudit.gov.ua/vr/ka/company.nsf/0/7D523C10B042849CC2257E980050EA5C/\\$file/%D0%94%D0%A1%D0%A2%D0%A3%20%D0%91%20%D0%94.1.1-7_2013.pdf](https://kyivaudit.gov.ua/vr/ka/company.nsf/0/7D523C10B042849CC2257E980050EA5C/$file/%D0%94%D0%A1%D0%A2%D0%A3%20%D0%91%20%D0%94.1.1-7_2013.pdf) (дата звернення: 01.08.2024).
3. Про затвердження Змін до Збірника укрупнених кошторисних розцінок на топографо-геодезичні та картографічні роботи : Наказ Міністерства охорони навколишнього природного середовища України від 22.12.2008 р. № 659. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0014-09#Text> (дата звернення: 01.08.2024).
4. Руденко І.В., Мельничук М.О., Кунічева Т.П. Обґрунтування прийняття рішень з ціноутворення з урахуванням можливостей управління витратами. *Бізнесінформ*. 2024. № 2. С. 159–165. DOI: <https://doi.org/10.32983/2222-4459-2024-2-159-165>.
5. Ларка Л.С., Павленко В.В. Ціноутворення в системі економічного управління розвитком бізнесу. *Приазовський економічний вісник*. 2021. Вип. 2. С. 104–107. DOI: <https://doi.org/10.32840/2522-4263/2021-2-19>.
6. Мартин А., Мороз Ю. Адаптація платності землекористування в Україні до умов воєнного часу: передумови, принципи, прикладні аспекти. *Економічний аналіз*. 2023. № 2(33). С. 273–281. DOI: <https://doi.org/10.35774/econa2023.02.273>.
7. Виговська Н.Г., Полчанов А.Ю., Дячек С.М. Формування та реалізація амортизаційної політики підприємств в сучасних умовах. *Ефективна економіка*. 2024. № 2. DOI: <http://doi.org/10.32702/2307-2105.2024.2.6>.

Pilicheva M.O. EXISTING APPROACHES TO PRICING IN THE SPHERE OF LAND MANAGEMENT

The article discusses the main approaches to the formation of the estimated cost of land management works. When forming estimates for the development of land management documentation, the cost of such works as: consulting services, collection of source information, preparation of materials for obtaining a permit for the development of land management documentation, topographic-geodetic and cartographic works, land management searches, creation of an explanatory note and electronic document, approval materials are taken into account land management documentation, entering information into the State Land Cadastre, other overhead costs of the enterprise (depreciation of geodetic equipment, licensed software, rent of office space, etc.). It was determined that there are no clear standards approved at the legislative level, which contributes to the emergence of conflicts, misunderstandings and disagreements in the interpretation of the cost of works between customers and developers of land management documentation. The main factors affecting the formation of the estimate for the implementation of land management works have been identified, which include features of the area, economic and functional features. The percentage contribution of the components of the implementation of land management works during the development of land management documentation was determined. The largest part of the estimate falls on the salary of the land surveying engineer, 75.89%, and the smallest percentage of the cost includes organizational and liquidation costs – 0.75%. Man-time costs when calculating the estimate in land management are key to determining the amount of work and resources needed to complete tasks within the set time, identifying inefficient stages of work and improving the quality of task performance, implementing modern methods and technologies to reduce the labor intensity of work. Depreciation of tangible (geodesic devices, office equipment) and intangible assets (specialized software, licenses and patents) must be taken into account in the estimate for land management works. The choice of the method of calculating depreciation costs depends on the financial strategy of the enterprise and the specifics of the use of fixed assets.

Key words: land management works, land management documentation, cost, estimate, pricing factors, depreciation costs.

UDC 621.373

DOI <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2024.4/56>**Burkovskiy Ya. Yu.**

National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute"

Zinkovsky Yu. F.

National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute"

SIMPLIFIED SHUNT BANDWIDTH CHARACTERIZATION GENERATOR FOR WIDE BANDGAP POWER CONVERTERS

Modern wide bandgap devices based on gallium nitride (GaN) and silicon carbide (SiC) can achieve switching transients within a few nanoseconds or even faster. To thoroughly measure and analyze these fast-switching transients processes, high bandwidth sensors are required. These sensors must introduce minimal additional parasitic inductance to the switching power loop. As switching times decrease, non-ideal effects become increasingly significant, potentially obscuring useful signal measurements. In miniature circuits, current probes and certain other methods require looping a high-current wire to accommodate the current measurement device. This loop adds detrimental inductance to the circuit, altering its operating characteristics at short response times. Therefore, current probes and magnetic field-based current measurement methods (for example, Hall-effect devices and Rogowski coils) are less suitable for high-frequency, wide-bandwidth current measurements.

Shunt resistors are a primary technique for high-frequency current measurements. A common way to characterize a shunt resistor or other resistive current measurement device/method is by applying a well-defined, sharp rise time (in the order of nanoseconds or less) voltage source through it and comparing the measured voltage. An example setup involves connecting the shunt in series with a resistive load and a specially designed GaN-based half-bridge. The switch node voltage can be easily measured, from which the current flowing through the shunt resistor and the load resistor can be derived. However, this setup requires a relatively expensive and complex arrangement.

In this paper, we propose a cheaper and simpler alternative for shunt bandwidth measurement generator, utilizing off-the-shelf logic elements and generally accessible hardware.

Keywords: Gallium Nitride (GaN), power converters, wide bandgap semiconductors, shunt characterization, pulse generator.

Introduction and Problem Statement. Wide bandgap semiconductors, specifically high electron mobility transistors (HEMTs) in gallium nitride (GaN), outpace silicon-based power semiconductors in switching speeds. This rapid switching introduces challenges in accurately measuring voltage and current. While devices capable of measuring fast transient voltages exist, current measurement techniques lag behind, particularly for high-frequency applications. Current measuring devices often need physical integration into the circuit or magnetic coupling, which can disrupt the circuit's operation.

For power converters below 1MHz, current measurement technology is well-established. However, these devices have limited bandwidth, suffer from response time delays, and struggle with high-frequency accuracy, increasing their susceptibility

to interference. As switch times decrease, these non-ideal characteristics intensify, eventually obscuring critical measurements. In miniaturized circuits, methods like current probes require looping the circuit wire to accommodate measurement devices, such as hall-effect sensors or Rogowski coils. This looping introduces harmful inductance, altering the circuit's behavior at quick response times.

A typical method involves characterizing the coaxial shunt resistor or another resistive measurement technique by running a well-defined, sharp rise time current pulse through it and comparing the resulting voltage measurement. For example, one might connect the shunt in series with a resistive-load half-bridge [1] (Figure 1).

Measuring the switch node voltage allows us to determine the current through both the coaxial

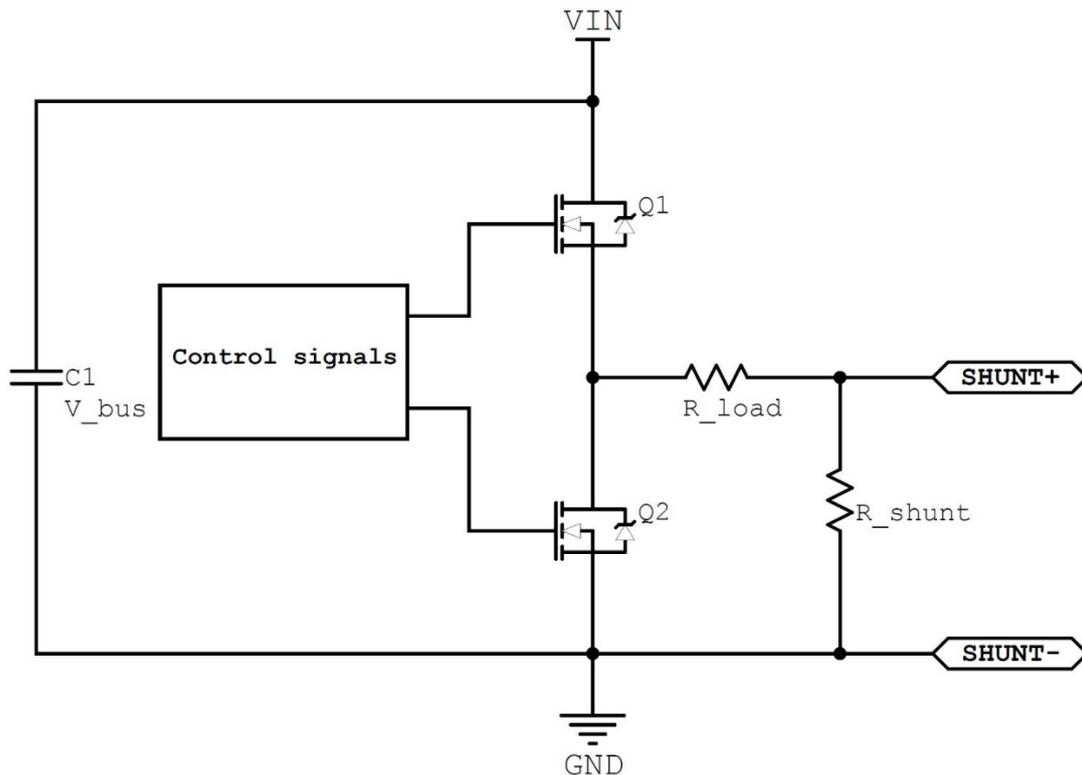


Fig. 1. Resistive-load half-bridge

shunt resistor and the load resistor. However, this configuration struggles with bandwidth measurements extending into several GHz. The frequency content of the rising edge can be calculated as [2]:

$$f_c = \frac{0.35}{t_r} \quad (1)$$

Despite the superior speed of wide bandgap devices over silicon devices, producing such fast-rising pulses poses a substantial challenge. This paper suggests a more cost-effective and straightforward alternative for measuring shunt bandwidth, using readily available logic elements and accessible hardware.

Analysis of recent research and publications. The development of measurement shunts with high bandwidth and the integration of short-rise time generators for shunt bandwidth measurement have become an important topic in modern power electronics. Current shunts are characterized by their wide frequency response and short rise times, making them highly accurate for resistance measurements in high-frequency environments. According to a study published on NCBI (2021), these current shunts exhibit excellent performance, demonstrating their crucial role in applications requiring precise current measurement at high speeds (P Piekilny, A Waindok) [3].

The construction and installation of shunts are critical factors influencing measurement accuracy. An

investigation into miniaturized measurement shunts reveals the potential for significant errors due to improper design, leading to either too short or too long rise times. This underscores the need for meticulous engineering in the development of shunt resistors to ensure reliable performance in high-frequency applications and provided foundational insights into the challenges and solutions related to high-frequency shunt measurements. (J L Joannou et. al.) [4].

Research focusing on shunt resistor-based current measurements for fast-switching GaN devices has shown that shunt resistors with very low inductance or current viewing resistors (CVRs) can measure high currents at high frequencies with minimal offset. This capability is crucial for accurately capturing the behavior of fast-switching devices in power electronics (T Wickramasinghe et al.) [5].

The design and implementation of pulse generators capable of producing signals with extremely short rise times are essential for testing the bandwidth and response of measurement equipment. Discussions on platforms like EEVblog provide practical insights into constructing pulse generators with known rise times to evaluate the performance of shunt resistors (EEVblog) [6].

Recent advancements in probing techniques have enabled voltage and current measurements with high bandwidths without compromising PCB layout,

particularly for signals with very short rise times. A key development in this field is the introduction of a monolithic microwave integrated circuit (MMIC) comb generator, which can produce repetitive narrow pulses with a duration of 7.1 ps and sharp edges with a 4.2 ps fall time. This circuit, designed using 250 nm indium phosphide (InP) heterojunction bipolar transistor (HBT) technology and differential pairs, was characterized using a 110 GHz sampling oscilloscope. The band-limited frequency spectrum of the pulse was de-embedded at the circuit reference plane, showing a pulse duration of 7.1 ps and a peak amplitude of -0.333 V. In the frequency domain, the comb generator provided -48.7 dBm of output power at 110 GHz with a 1 GHz input signal, as reported by M. E. Urteaga et al. from Bristol University (2022) [7]. This innovation is crucial for capturing rapid transients in modern power electronics.

A notable study by W Zhang et al. on high-bandwidth, low-inductance current shunts for wide-bandgap devices further confirms these advancements, emphasizing the dynamic characterization required for precise measurements [8]. Their research, published in 2021, marks a significant step forward in the field.

Additionally, research on a novel calibration method of broadband shunts by Z Yang et al. has introduced innovative approaches to enhance the accuracy and reliability of broadband shunt measurements. This method, discussed in their 2022 study, addresses the challenges of calibration in high-frequency environments, ensuring better performance and reliability [9].

These advancements in shunt bandwidth measurement and short-rise time generators have significantly enhanced the accuracy and reliability of high-frequency measurements in modern electronics. Despite the all advancements in the field, there is a room for improvement for low-cost, short-rise time pulse generator.

Task statement

In this paper, we propose a cost-effective and simplified method for shunt bandwidth measurement using off-the-shelf logic elements and accessible hardware. Traditional methods for bandwidth measurement often involve complex and expensive setups that add detrimental inductance, affecting measurement accuracy. Our approach minimizes these issues by leveraging readily available components to achieve fast-switching transients, ensuring reliable characterization of shunt resistors under nanosecond-level switching conditions. This innovation provides a practical alternative to conventional methods,

offering both efficiency and accuracy in high-frequency measurement applications.

Outline of the main material of the study

The ultra-short rise time pulse generator circuit described here is tailored for shunt bandwidth measurement applications, which are critical in analyzing the fast-switching transients of modern wide bandgap devices such as gallium nitride (GaN) and silicon carbide (SiC). These devices achieve switching transients within a few nanoseconds or even faster, necessitating high bandwidth sensors that introduce minimal additional parasitic inductance to the switching power loop [10]. As switching times decrease, non-ideal effects become more pronounced, potentially obscuring useful signal measurements. Traditional current measurement methods, such as current probes and magnetic field-based devices, are unsuitable for high-frequency, wide-bandwidth current measurements due to the additional inductance they introduce. Instead, shunt resistors are preferred for their minimal inductive impact.

To accurately characterize a shunt resistor's bandwidth, a well-defined, sharp rise time voltage source is required. This source must apply a voltage through the shunt resistor, allowing for the measurement of the resulting voltage drop. The pulse generator circuit described here provides a cost-effective and simple alternative to more expensive and complex setups traditionally used for this purpose.

The proposed circuit (Figure 2) is divided into three main sections: the power supply LDO, IC's decoupling, and the pulse generator and driver.

The power supply section ensures a stable voltage supply for the circuit. It starts with an input protection diode (VD1) that protects against reverse voltage. Capacitors C1 and C3 provide bulk capacitance for input voltage smoothing, while the LDL1117S50R LDO regulator ensures a regulated output voltage. Output capacitors C2 and C4 further smooth the output voltage, and an indicator LED (VD2) signals the presence of the output voltage. This stable supply is crucial for the reliable operation of the subsequent stages.

The decoupling section focuses on stabilizing the power supply for the integrated circuits (ICs). Decoupling capacitors C5 and C6 provide local filtering to minimize noise and ensure stable operation of the ICs. The Schmitt trigger inverter (D3G, SN74AHC14DRG3) used in this section is critical for generating the fast edge transitions needed for the pulse.

The core of the circuit lies in the pulse generator and driver section. The Schmitt trigger inverter (D3A, SN74AHC14DRG3) is configured with a feedback

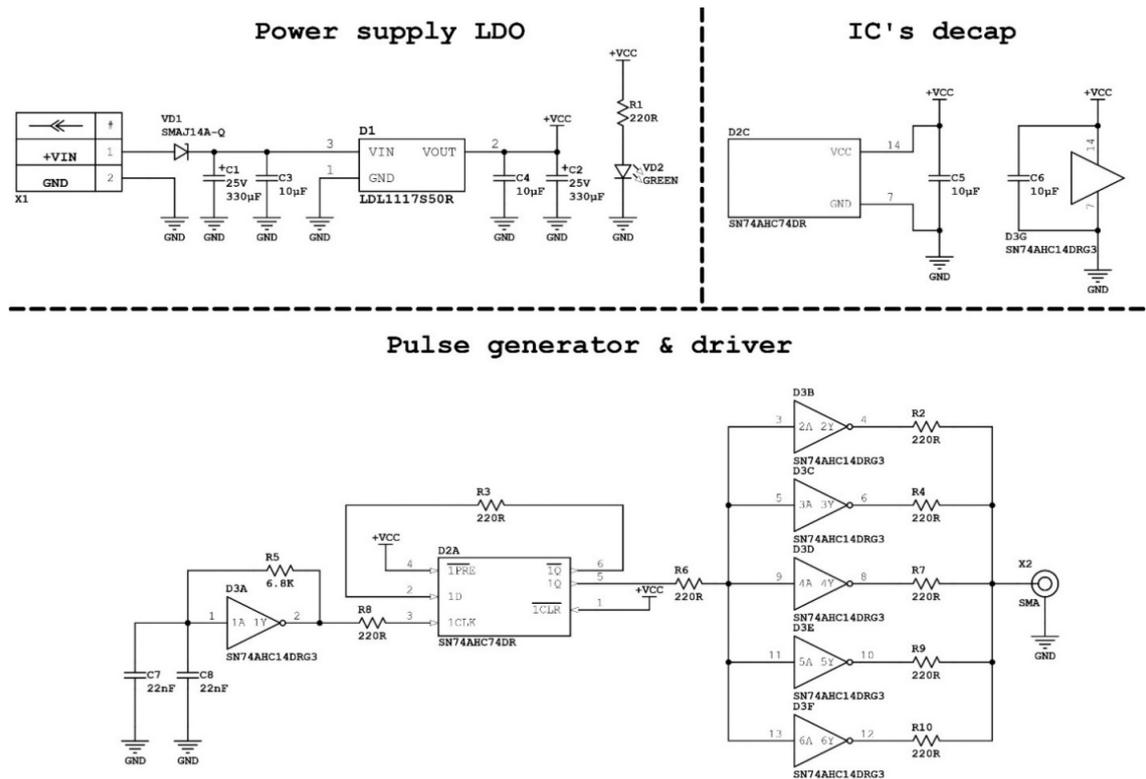


Fig. 2. Proposed generator schematic

resistor (R5) and capacitors (C7, C8) to create an oscillator. This configuration generates a square wave with very fast rising and falling edges. The frequency of oscillation is set to approximately 12 kHz by the RC network comprising R5, C7, and C8. This relatively low frequency allows the circuit to be used for characterizing shunt resistors with minimal impact from the oscillation frequency. The oscillation frequency can be estimated using following formula [11]:

$$f = \frac{1}{RC \ln \left(\frac{V_{cc} - V_{T-}}{V_{cc} - V_{T+}} \cdot \frac{V_{T+}}{V_{T-}} \right)} \quad (2)$$

where V_{cc} is supply voltage (5V), V_{T+} – positive-going threshold, V_{T-} – negative-going threshold, R and C – values of configuration resistor and capacitor.

The D-type flip-flop (D2A, SN74AHC74DR) is configured into a divider circuit, ensuring a 50% duty cycle of produced pulses, regardless of input signal characteristics.

The generated square wave is then fed into the remaining inverters (D3B-D3F) connected in parallel. This parallel configuration boosts the drive capability and maintains the integrity of the fast edges, which are essential for accurate shunt bandwidth measurements. Each inverter output is coupled with a series resistor (R2, R4, R7, R9, R10) to ensure appropriate output impedance matching. These resistors approximate a

50-ohm output impedance, crucial for minimizing signal reflections and ensuring efficient power transfer to the measurement setup. Additionally, the resistors provide protection against potential short circuits by limiting the current.

The pulse generator's output is connected to an SMA connector (X2), facilitating easy connection to a measurement setup that includes the shunt resistor and an oscilloscope. When a pulse is transmitted through the shunt resistor, the voltage drop across the resistor can be measured. This measurement allows for the determination of the current flowing through the shunt, thereby characterizing the resistor's bandwidth. The fast rise time of the pulse ensures that the measurement captures high-frequency characteristics accurately.

This pulse generator circuit offers an economical and efficient solution for generating the fast rise time pulses required in shunt bandwidth measurement applications. Its design leverages a Schmitt trigger inverter and carefully selected passive components to achieve rapid edge transitions, making it suitable for high-resolution analysis of fast-switching transients in modern wide bandgap devices. By providing a simpler and cheaper alternative to traditional setups, this circuit enables precise bandwidth characterization of shunt resistors, facilitating better design and

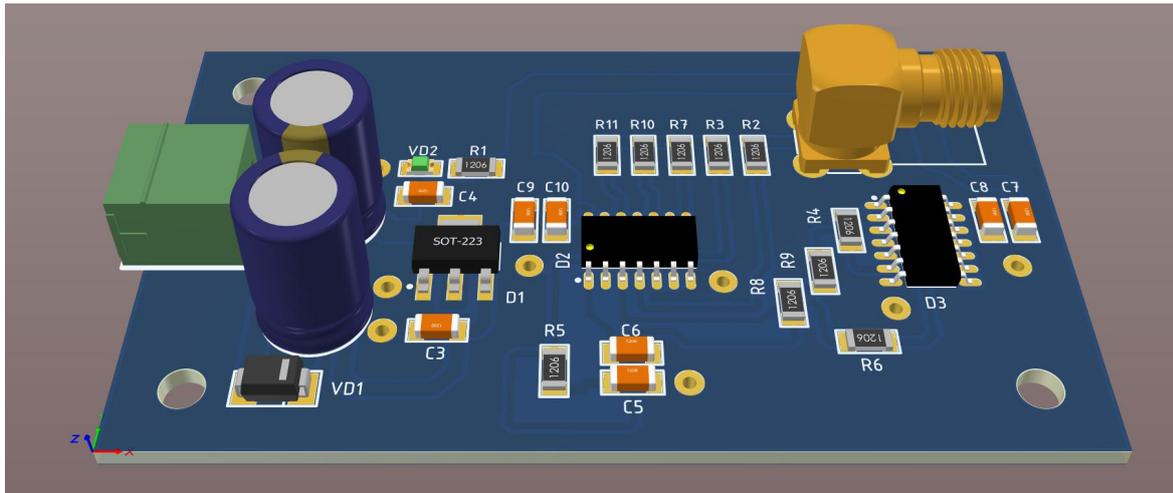


Fig. 3. 3D model of PCB of the generator

analysis of high-speed electronic systems. 3D model of designed PCB is displayed on Figure 3.

The pulse generator circuit described was tested, and the output waveforms were captured using an oscilloscope. The first waveform shows a square wave with a frequency of approximately 6.536 kHz, a peak-to-peak voltage of 5.52V and rise and fall times around 10 nanoseconds (oscilloscope limit). This confirms the circuit's capability to produce sharp edges essential for bandwidth characterization applications (Figure 4).



Fig. 4. Square Wave Output from Pulse Generator Circuit

The second waveform (Figure 5) provides a closer look at the rising edge of the pulse, displaying a rise time of approximately 1.94 nanoseconds. This rise time is limited by the oscilloscope's measurement capabilities, indicating that the actual rise time could be even faster. Despite some ringing observed in the waveform, the fast rise time is adequate for accurately measuring the bandwidth of shunt resistors in high-speed electronic circuits, ensuring minimal introduction of parasitic inductance. This

performance demonstrates the circuit's suitability for precise characterization of high-frequency current measurement devices.

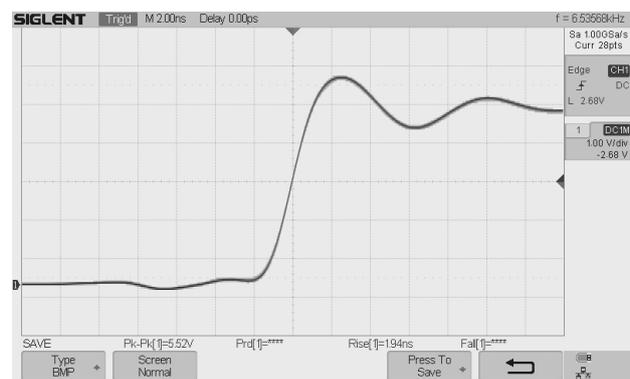


Fig. 5. Detailed Rising Edge of Pulse from Pulse Generator Circuit

Conclusions. The proposed pulse generator circuit provides a cost-effective and efficient solution for generating ultra-short rise time pulses necessary for shunt bandwidth measurement in high-speed electronic circuits. Utilizing readily available off-the-shelf components, this design offers an alternative to more complex and expensive setups traditionally used for this purpose. The circuit leverages a Schmitt trigger inverter to achieve rapid edge transitions, essential for accurately characterizing the bandwidth of shunt resistors used in modern wide bandgap devices double-pulse testing such as gallium nitride (GaN) and silicon carbide (SiC).

Oscilloscope measurements confirm the circuit's performance, displaying a square wave with a frequency of 6.536 kHz, a peak-to-peak voltage of 5.52V, and rise and fall times around 10 nanoseconds, limited by the oscilloscope's capabilities. Detailed

analysis of the rising edge reveals a rise time of approximately 1.94 nanoseconds, indicating the circuit's capability to produce even faster transitions.

This fast rise time is crucial for accurately measuring the bandwidth of shunt resistors, as it ensures higher bandwidth of the measurement setup. The simplicity and low cost of the circuit make it an accessible tool for engineers and researchers working

with high-frequency, wide-bandwidth current measurements in power electronics.

Overall, this pulse generator circuit demonstrates its suitability for precise characterization of high-frequency current measurement devices, facilitating better design and analysis of fast-switching transients in modern wide bandgap semiconductor applications.

Bibliography:

1. Some considerations for miniaturized measurement shunts in high frequency power electronic converters / A. J. L. Joannou et al. *2014 16th European Conference on Power Electronics and Applications (EPE'14-ECCE Europe)*, Lappeenranta, Finland, 26–28 August 2014. 2014. URL: <https://doi.org/10.1109/epe.2014.6910901> (date of access: 20.06.2024).
2. Levine W. S. *The Control Systems Handbook: Control System Advanced Methods*, Second Edition (Electrical Engineering Handbook). 2nd ed. CRC, 2011.
3. Piekilny P., Waindok A. Using a Current Shunt for the Purpose of High-Current Pulse Measurement. *Sensors*. 2021. Vol. 21, no. 5. P. 1835. URL: <https://doi.org/10.3390/s21051835> (date of access: 20.06.2024).
4. *Measurement Techniques for High-Speed GaN E-HEMTs*. Munich : GaN Systems, 2018. 26 p. URL: <https://gansystems.com/design-center/application-notes/> (date of access: 20.06.2024).
5. A Study on Shunt Resistor-based Current Measurements for Fast Switching GaN Devices / T. Wickramasinghe et al. *IECON 2019 - 45th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society*, Lisbon, Portugal, 14–17 October 2019. 2019. URL: <https://doi.org/10.1109/iecon.2019.8927490> (date of access: 20.06.2024).
6. Pulse generator, rise time and Rigol DS1054z bandwidth. *EEVblog Electronics Community Forum*. URL: <https://www.eevblog.com/forum/testgear/pulse-generator-rise-time-and-rigol-ds1054z-bandwidth/> (date of access: 20.06.2024).
7. A 110 GHz Comb Generator in a 250 nm InP HBT Technology / J. Cheron et al. *IEEE Microwave and Wireless Components Letters*. 2022. P. 1–4. URL: <https://doi.org/10.1109/lmwc.2022.3164511> (date of access: 20.06.2024).
8. High-Bandwidth Low-Inductance Current Shunt for Wide-Bandgap Devices Dynamic Characterization / W. Zhang et al. *IEEE Transactions on Power Electronics*. 2021. Vol. 36, no. 4. P. 4522–4531. URL: <https://doi.org/10.1109/tpel.2020.3026262> (date of access: 20.06.2024).
9. Research on a Novel Calibration Method of Broadband Shunt / Z. Yang et al. *2022 IEEE International Instrumentation and Measurement Technology Conference (I2MTC)*, Ottawa, ON, Canada, 16–19 May 2022. 2022. URL: <https://doi.org/10.1109/i2mtc48687.2022.9806659> (date of access: 20.06.2024).
10. Burkovskiy Y. Y., Zinkovsky Y. F. GALLIUM NITRIDE SEMICONDUCTORS: TRANSFORMING THE TELECOMMUNICATION SYSTEMS POWER SUPPLY PERFORMANCE. *Scientific notes of Taurida National V.I. Vernadsky University. Series: Technical Sciences*. 2024. Vol. 2, no. 1. P. 211–215. URL: <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2024.1.2/33> (date of access: 20.06.2024).
11. Exactly How Schmitt Trigger Oscillators Work – Technical Articles. *All About Circuits – Electrical Engineering & Electronics Community*. URL: <https://www.allaboutcircuits.com/technical-articles/exactly-how-schmitt-trigger-oscillators-work/> (date of access: 20.06.2024).

Бурковський Я.Ю., Зіньковський Ю.Ф. ГЕНЕРАТОР ІМПУЛЬСІВ З КОРОТКИМ ЧАСОМ НАРАСТАННЯ ДЛЯ ВИМІРЮВАННЯ ХАРАКТЕРИСТИК ШУНТІВ ПЕРЕТВОРЮВАЧІВ НА ОСНОВІ НАПІВПРОВІДНИКІВ З ШИРОКОЮ ЗАБОРОНЕНОЮ ЗОНОЮ

Сучасні силові перетворювачі на основі нітриду галію (GaN) і карбїду кремнію (SiC) (напівпровідників з широкою забороненою зоною) можуть досягати перехідних процесів перемикання до кількох наносекунд або навіть швидше. Для ретельного вимірювання та аналізу цих перехідних процесів потрібні датчики зі значною смугою пропускання. Ці датчики повинні вводити мінімальну додаткову паразитну індуктивність до комутаційного контуру живлення. У міру того, як час перемикання зменшується, паразитні ефекти стають все більш значущими, потенційно вносячи недопустимі завади у корисний вимірний сигнал. У компактних перетворювачах індуктивні датчики струму та деякі інші методи вимагають пропускання силового дроту від комутаційного контуру через датчик. Створена петля додає значну паразитну індуктивність до схеми, змінюючи її робочі характеристики та час наростання. Тому датчики струму та методи вимірювання струму на основі впливу магнітного

поля (наприклад, пристрої на ефекті Холла та котушки Роговського) менш придатні для вимірювання струму в високочастотних перетворювачах, де критичною є широка смуга пропускання.

Шунтуючі резистори є основним методом вимірювання струмів високої частоти. Загальноприйнятий спосіб охарактеризувати шунтуючий резистор або інший пристрій/метод резистивного вимірювання струму полягає в прикладанні до нього джерела струму з чітко визначеним швидким часом наростання та порівняння виміряної напруги. Приклад такої установки передбачає послідовне з'єднання шунта з резистивним навантаженням і напівмостом на основі нітрид-галієвих силових елементів. Однак ця установка відносно дорога та конструкційно складна.

У цій статті ми пропонуємо дешевшу та простішу альтернативу для вимірювання смуги пропускання шунта, використовуючи готові логічні елементи та загальнодоступне обладнання.

Ключові слова: Нітрид галію (GaN), перетворювачі потужності, широкозонні напівпровідники, вимірювання характеристик шунта, генератор імпульсів.

Томашевський Р.С.

Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут»

Васильчук Д.П.

Бахмутський навчально-науковий професійно-педагогічний інститут
Харківського національного університету імені В. Н. Каразіна

Залужна Г.В.

Бахмутський навчально-науковий професійно-педагогічний інститут
Харківського національного університету імені В. Н. Каразіна

Семенець Д.А.

Бахмутський навчально-науковий професійно-педагогічний інститут
Харківського національного університету імені В. Н. Каразіна

МЕТОДИКА ВИМІРЮВАННЯ ПАРАМЕТРІВ ЕКВІВАЛЕНТНОЇ ЕЛЕКТРИЧНОЇ СХЕМИ П'ЄЗОРЕЗОНАНСНОГО ДАТЧИКА НА ОСНОВІ ВИМІРЮВАННЯ ЧАСТОТ НУЛЬОВОЇ ФАЗИ

У статті розглянуто методики вимірювання параметрів еквівалентної електричної схеми (ЕЕС) п'єзореzonаторів. Представлено нову методику, засновану на фазовому методі вимірювання, яка дозволяє визначати параметри ЕЕС з високою точністю.

П'єзореzonансні датчики, що випускаються серійно, надають обмежений набір вихідних даних, що зазвичай включає тільки резонансну частоту, пропорційну вимірюваній величині. Однак використання параметрів еквівалентної електричної схеми (ЕЕС) датчика як джерела інформації про вимірювані величини дозволяє отримати значно ширший спектр даних. Це особливо важливо для розробки мультифізичних датчиків, які можуть одночасно вимірювати декілька фізичних величин і забезпечувати високу точність вимірювань у складних умовах експлуатації. Проте такі мультифізичні датчики вимагають складних методик вимірювань, що призводить до необхідності використання значних обчислювальних ресурсів і дорогого обладнання. Стандартні методики вимірювання параметрів ЕЕС з використанням лабораторного обладнання включають окремі вимірювання паралельної ємності C_0 , динамічного опору R_1 , а також обчислення динамічної індуктивності L_1 та ємності C_1 з застосуванням наближених формул.

У даній роботі представлена нова методика вимірювання параметрів ЕЕС, яка не потребує додаткових зовнішніх пристроїв і базується на використанні доступного лабораторного обладнання. Запропонована методика базується на точних аналітичних співвідношеннях, що усуває необхідність у наближених методах розрахунку. Це значно спрощує процес вимірювань, забезпечуючи високу точність результатів.

Точність запропонованої методики підтверджена результатами комп'ютерного моделювання з використанням програмного продукту *Advanced Design System (ADS)*. Отримані результати показали високу ступінь наближення до нормативних технічних параметрів, наданих виробником, з максимальним відхиленням параметрів не більше 0,0291%.

Ключові слова: п'єзореzonансний датчик, частота нульової фази, еквівалентна електрична схема, модель *Butterworth – Van Dyke*, векторний аналізатор кіл, П-подібний пасивний вимірювальний чотириполюсник.

Постановка проблеми. Сучасні п'єзореzonансні датчики для вимірювання декількох фізичних величин потребують складних методик вимірювання параметрів ЕЕС, що потребує складні вимірювальні комплекси та значні обчислювальні ресурси. Традиційні методики

включають окремі вимірювання параметрів ЕЕС з використанням наближених формул, що вносять додаткову методичну похибку. Таким чином, існує необхідність у розробці нових методик, які б забезпечували високу точність вимірювань параметрів ЕЕС з мінімальною кількістю вимірю-

вальних приладів і використанням наближених методів розрахунку, використовуючи при цьому доступне метрологічне обладнання.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. П'єзореzonансні датчики є невід'ємною частиною сучасних вимірювальних технологій завдяки своїм унікальним характеристикам і широкому спектру застосувань. Завдяки своїм перевагам п'єзореzonансні датчики знайшли широке застосування в різних областях. У промисловій автоматизації вони використовуються для вимірювання тиску, вібрації та прискорення. У медичній техніці вони використовуються для вимірювання артеріального тиску та частоти серцевих скорочень, а також для вимірювання швидкості повітряного потоку в спірометричних приладах [1-5].

Електричні властивості п'єзореzonансного датчику поблизу резонансної частоти можуть бути представлені еквівалентною електричною схемою (ЕЕС), показаною на рисунку 1. Ця схема базується на моделі Butterworth – Van Dyke (BVD) і описує властивості п'єзореzonансатора, що працює на товщинно-зсувних (TSh) типах коливань. Van Dyke був першим, хто запропонував цю модель, а пізніше розширив її, додавши кілька паралельних контурів (рис. 1.б) для врахування резонансів на вищих гармоніках. Модель рекомендована як стандартна Міжнародною електротехнічною комісією [5].

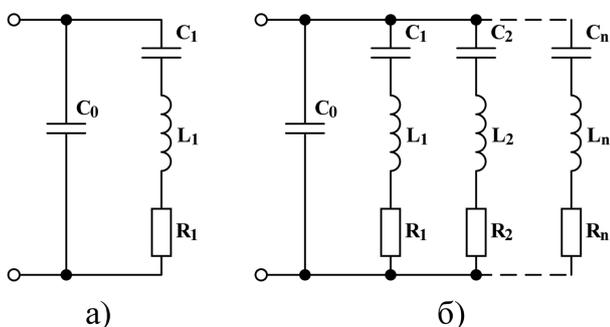


Рис. 1. Модель BVD (а); розширена модель BVD (б)

Коліваюча маса представлена динамічною індуктивністю L_1 , пружність – динамічною ємністю C_1 , а активний опір R_1 пов'язаний з розсіюванням теплової енергії під час коливань. Ємність C_0 паралельної гілки асоціюється з електростатичною ємністю п'єзоелектричної (ПЕ) пластини, де ПЕ виступає в ролі діелектрика. Модель BVD досить точно описує поведінку п'єзореzonансатора в області частот, що знаходяться поблизу резонансу; за її межами п'єзореzonансатор веде себе як звичайний конденсатор.

Для точного вимірювання параметрів ЕЕС п'єзореzonансаторів дослідники та інженери викорис-

товують спеціалізований аналізатор кіл S&A350A, розроблений компанією Saunders & Associates. Цей прилад, оснащений інтерфейсом, спеціально призначеним для підключення п'єзореzonансаторів, детально описаний у роботі [6]. Алгоритм його роботи відповідає стандарту, наведеному у цій же роботі.

Окрім наведеного вище аналізатора, для вимірювання параметрів ЕЕС п'єзореzonансатора також активно використовується векторний мережевий аналізатор (VNA). Хоча його принцип роботи аналогічний аналізатору S&A350A, через невідповідність інтерфейсів VNA не підходить для прямих вимірювань параметрів п'єзореzonансаторів. Як рішення застосовується П-подібний пасивний вимірювальний чотириполіусник, який забезпечує необхідні інтерфейси та кріплення, що дозволяє адаптувати стандартні методи вимірювань для п'єзореzonансаторів. Недоліки векторного мережевого аналізатора (VNA) аналогічні тим, що спостерігаються у аналізаторі кіл S&A350A.

Для забезпечення високої точності вимірювань параметрів кварцових резонаторів рекомендується використовувати фазовий метод у поєднанні з пасивним П-подібним вимірювальним чотириполіусником, схема якого представлена на рисунку 2. Цей метод, визнаний Міжнародною електротехнічною комісією як стандартний, дозволяє ізолювати п'єзореzonансатор від вимірювальних приладів, забезпечуючи тим самим стабільність вимірювань.

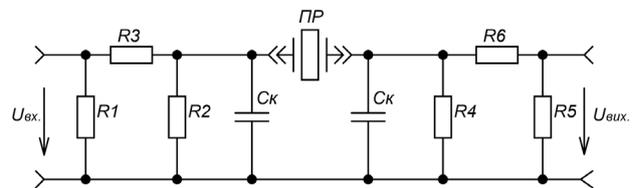


Рис. 2. П-подібний пасивний вимірювальний чотириполіусник

У роботі [7] досліджувався вплив різних видів навантажень, таких як тиск і в'язкість навколишнього середовища, на параметри ЕЕС п'єзореzonансатора датчика тиску. Для врахування впливу навантаження на п'єзореzonансаторний датчик в послідовну гілку ЕЕС були включені додаткові елементи: опір R_2 та індуктивність L_2 , які відображають відповідно вплив в'язкості і тиску середовища на датчик.

Експериментальні результати, представлені в статті, показали, що вимірювання імпедансу датчика тиску у вакуумній камері з використанням аналізатора імпедансу дозволяє точно відстежувати зміни імпедансу при різних рівнях тиску.

У роботі представлені графіки залежності індуктивності від тиску повітря, отримані в результаті як експериментальних, так і теоретичних досліджень. Отримані графіки підтверджують високу чутливість параметра до змін тиску, що дозволяє використовувати його для точного моніторингу тиску в широкому діапазоні.

Відомі дослідження [8], в яких розглянуто вплив провідності та діаметра електродів на параметри еквівалентної електричної схеми (ЕЕС) п'єзореzonаторів. Було встановлено, що діаметр електродів впливає на параметри ємностей C_1 та C_0 , тоді як матеріал електродів має значний вплив на опір R_1 . Експериментальні дані, представлені в роботі, показали, що залежність площі електродів від параметрів C_1 та C_0 має високу лінійність. Це дозволяє використовувати дану залежність для точного визначення площі електродів. Лінійна залежність опору R_1 від провідності електродів, як показано в роботі, є ефективним інструментом для виявлення стану корозії на електродах. У роботі описаний метод, який дозволяє одночасно визначати всі чотири параметри еквівалентної електричної схеми (ЕЕС). Цей метод базується на визначенні резонансних частот f_r та f_a , при яких фазовий зсув між вхідним і вихідним сигналами складає нуль градусів. Такий підхід широко застосовується для точного вимірювання резонансної частоти кварцових резонаторів та інших осциляторів. Система рівнянь для визначення параметрів ЕЕС використовує дані, отримані при вимірюванні резонансної f_r і антирезонансної f_a частот, а також значення похідних фазочастотної характеристики. Недоліком є відсутність аналітичних виразів для визначення параметрів ЕЕС і необхідність використання числових методів для вирішення систем рівнянь, що потребує значних обчислювальних ресурсів і налаштування.

У роботі [9] запропонований метод, аналогічний методу з [9], але з включенням аналітичних виразів для обчислення параметрів. Результати були перевірені засобами комп'ютерного моделювання, отримана похибка не перевищує 0,03%. Недоліком запропонованого методу є необхідність використання навантажувального конденсатора, що ускладнює вимірювання через додаткові паразитні елементи, які вимагають корекції моделі або методів вимірювання.

Постановка завдання. Ціль даної роботи полягає у розробці нової методики вимірювання параметрів еквівалентної електричної схеми п'єзореzonатора, заснованої на фазовому методі непрямих вимірювань. Нова методика повинна спростити процес вимірювань і включати точні аналітичні вирази для розрахунку параметрів ЕЕС. Це дозволить значно знизити обчислювальні ресурси і підвищити точність вимірювань.

Виклад основного матеріалу. Використання ЕЕС п'єзореzonатора, яка представлена на рисунку 1, дає підстави визначити його електричні параметри поблизу резонансу у вигляді імпедансу [5]:

$$Z_n(\omega) = \frac{\omega L_n - \frac{1}{\omega C_n} - jR_n}{\omega C_0 R_n + j \left[\omega C_0 \left(\omega L_n - \frac{1}{\omega C_n} \right) - 1 \right]} = R_n(\omega) + jX_n(\omega) \quad (1)$$

Дійсну частину імпедансу можна записати у вигляді:

$$R_n(\omega) = \frac{R_n (C_n^2 / C_0^2)}{(\omega R_n C_n)^2 + (1 + C_n / C_0 - \omega^2 C_n L_n)^2}, \quad (2)$$

а уявну частину як:

$$X_n(\omega) = -\frac{1}{\omega C_0} \frac{(\omega C_n L_n)^2 + (1 - \omega^2 C_n L_n)(1 + C_n / C_0 - \omega^2 C_n L_n)}{(\omega C_n L_n)^2 + (1 + C_n / C_0 - \omega^2 C_n L_n)^2}. \quad (3)$$

Перепишемо дійсну $R_n(\omega)$ та уявну $X_n(\omega)$ частини імпедансу в наступному вигляді:

$$R_n(\omega) = \frac{1}{C_0 \omega} \left(\frac{\omega_p^2 - \omega_s^2}{\omega_s^2} \right) \frac{\frac{\omega}{\omega_s Q}}{\left(\frac{\omega}{\omega_s Q} \right)^2 + \left(\frac{\omega^2}{\omega_s^2} - \frac{\omega_p^2}{\omega_s^2} \right)}, \quad (4)$$

$$X_n(\omega) = -\frac{1}{C_0 \omega} \frac{\left(\frac{\omega}{\omega_s Q} \right)^2 + \left(\frac{\omega^2}{\omega_s^2} - 1 \right) \left(\frac{\omega^2}{\omega_s^2} - \frac{\omega_p^2}{\omega_s^2} \right)}{\left(\frac{\omega}{\omega_s Q} \right)^2 + \left(\frac{\omega^2}{\omega_s^2} - \frac{\omega_p^2}{\omega_s^2} \right)}. \quad (5)$$

де $\omega_s = \frac{1}{\sqrt{L_1 C_1}}$ – частота послідовного резонансу;

$\omega_p = \frac{1}{\sqrt{L_1 \frac{C_1 C_0}{C_1 + C_0}}}$ – частота паралельного резонансу;

$Q = \frac{\omega_s L_1}{R_1}$ – добротність.

Визначимо резонансні частоти ω_r та ω_a , при яких реактивна провідність досягає нуля, а фазовий зсув між вхідним та вихідним сигналами дорівнює нулю. Для цього прирівняємо до нуля реактивну складову X_e у формулі (3):

$$\omega_{r,a} = \frac{1}{\sqrt{2}Q} \sqrt{Q^2(\omega_p^2 + \omega_s^2) - \omega_s^2 \mp \sqrt{(Q^2\omega_p^2 + (Q^2 - 1)\omega_s^2)^2 - 4Q^4\omega_p^2\omega_s^2}} \quad (6)$$

Після виконання ряду математичних перетворень рівняння включаючи перетворення складного квадратного кореня, можна отримати наступні вирази:

$$\begin{cases} \omega_s \omega_p = \omega_r \omega_a \\ \left(1 - \frac{1}{Q^2} \right) \omega_s^2 + \omega_p^2 = \omega_r^2 + \omega_a^2 \end{cases} \quad (7)$$

Запишемо дійсну частину $R_n(\omega)$ для резонансної частоти ω_r :

$$R_n(\omega_r) = R_0 = \frac{Q\omega_s (\omega_p^2 - \omega_s^2)}{C_0 (\omega_s^2 \omega_r^2 + Q^2 (\omega_p^2 - \omega_s^2)^2)} \quad (8)$$

Опір $R_n(\omega)$ на частоті ω , визначається методом заміщення з використанням каліброваного змінного резистора. Опір цього резистора регулюється доти, поки покази вольтметра не стануть такими ж, як і раніше, при яких $X_e = 0$ і фазовий зсув між вхідним та вихідним сигналами дорівнював нулю.

Сумісне рішення системи рівнянь (7) і рівняння (8) відносно невідомих резонансних частот ω_s , ω_p та добротності Q буде наступним:

$$\begin{cases} \omega_s = \frac{(\alpha_1 + \alpha_3 - 1)\beta_0\omega_r}{2\sqrt{2}(\alpha_1 - \alpha_2)} \\ \omega_p = \frac{(\alpha_3 + 2\alpha_2 - \alpha_1 - 1)\beta_0\omega_a}{2\sqrt{2}(\alpha_1 - \alpha_2)\alpha_2} \\ Q = \frac{\beta_0\omega_r}{\sqrt{2}(\sqrt{\alpha_2\omega_a} - \sqrt{\alpha_1\omega_r})} \end{cases} \quad (9)$$

де

$$\alpha_1 = R_0^2 C_0^2 \omega_r^2, \alpha_2 = R_0^2 C_0^2 \omega_a^2, \alpha_3 = \sqrt{(1 + R_0^2 C_0^2 \omega_r^2)^2 - 4R_0^2 C_0^2 \omega_a^2},$$

$$\beta_0 = \sqrt{1 + \alpha_1(\alpha_2 + 1) - \alpha_2(\alpha_3 + 3) + \alpha_3}.$$

Підстановка виразів для резонансних частот ω_s , ω_p і добротності Q у систему рівнянь (9) дозволяє отримати аналітичні формули для визначення параметрів ЕЕС:

$$\begin{cases} L_1 = \frac{2\alpha_1}{\omega_r^2 C_0 (\alpha_1 + 1)(1 - \alpha_1 - \alpha_3)} \\ C_1 = C_0 \left(\frac{\left(1 + \alpha_1 - \alpha_3 - 2\alpha_1 \frac{\omega_a^2}{\omega_r^2}\right)^2}{\alpha_1 \alpha_2 (\alpha_1 + \alpha_3 - 1)^2} - 1 \right) \\ R_1 = \frac{\sqrt{\alpha_1 \omega_r} - \sqrt{\alpha_2 \omega_a}}{C_0 (1 + \alpha_1)(\omega_r^2 - \omega_a^2)} \end{cases} \quad (10)$$

Для успішного застосування запропонованої методики визначення параметрів ЕЕС необхідно виконати декілька ключових етапів. На початковому етапі важливо точно визначити паралельну ємність C_0 , оскільки вона істотно впливає на розрахунок всіх інших параметрів ЕЕС. Для високої точності вимірювань рекомендується використовувати вимірювач RLC. Наступний етап включає визначення ключових резонансних частот ω_r , ω_a фазовим методом, а також визначення опору R_0 методом заміщення. На заключному етапі слід застосувати математичні співвідношення (10) для розрахунку значень параметрів ЕЕС.

Для комп'ютерного моделювання моделі BVD п'єзореzonатора використано програмний пакет Advanced Design System (ADS). Схема комп'ютерної моделі представлена на рисунку 3.

Для моделювання буде використаний кварцовий резонатор РК459 (АТ-зріз) на частоту 20 МГц. Параметри ЕЕС п'єзореzonатора, заявлені виробником: $R_1 = 2,93798 \text{ Ohm}$, $C_0 = 4,26104 \text{ pF}$, $C_1 = 17,52709 \text{ fF}$, $L_1 = 3,61305 \text{ mH}$, $Q = 154,5376 \cdot 10^3$. Аналіз частотних характеристик проводитиметься з використанням модуля моделювання «S-параметрів» (S_Param Simulation). Компонент XTAL1 застосовується для завдання моделі BVD п'єзореzonатора, а компоненти Term¹ та Term² використовуються для моделювання вхідного та вихідного опору вимірювальної схеми.

У даній роботі значення Term¹ та Term² встановлені як нульові, оскільки розглядається ненавантажений режим роботи кварцового резонатора. Моделювання проводилося в діапазоні частот від 19,990 МГц до 20,050 МГц з кроком в 1 Гц. Вибір кроку в 1 Гц для побудови фазочастотної характе-

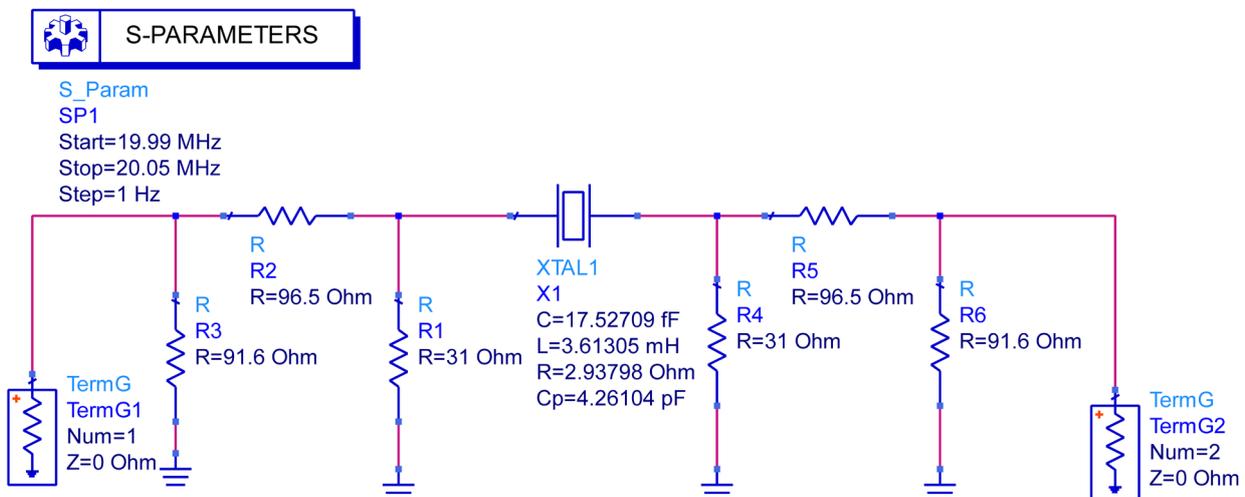


Рис. 3. Схема для імітаційного моделювання, розроблена за допомогою програмного пакету ADS

ристики обумовлений можливостями векторного аналізатора мереж (VNA), який, згідно з джерелом [6], має саме такий частотний дозвіл.

Для визначення параметрів еквівалентної електричної схеми (ЕЕС) п'єзореzonатора на основі результатів моделювання потрібно виконати декілька ключових етапів.

По-перше, слід визначити резонансні частоти f_r , f_a із ФЧХ. Через високу крутість фазочастотної кривої поблизу точки з нульовою фазою точне визначення частоти утруднено. Тому спочатку визначаються дві точки, що найбільш близькі до нульової фази, а потім частота в точці з нульовою фазою обчислюється за допомогою лінійної інтерполяції.

Так, наприклад, визначення частоти f_r (див. рис. 4) складається рівняння прямої, що проходить через точки з відомими координатами $m_1(19999892\text{Hz}; 1,414 \text{ deg.})$ і $m_2(19999946\text{Hz}; -1,402 \text{ deg.})$. Потім у це рівняння підставляється значення ординати точки, де ФЧХ дорівнює нулю, і з рішення рівняння визначається абсциса, яка відповідна частоті $f_r = 19999919,115\text{Hz}$.

Аналогічно визначається друга ключова резонансна частота $f_a = 20041021,581\text{Hz}$.

На другому етапі визначаємо опір R_0 з використанням рівняння (8), після чого підставляємо знайдені значення ключових резонансних частот f_r , f_a та опір R_0 у систему рівнянь (10). Це дозволяє отримати розрахункові значення параметрів ЕЕС п'єзореzonатора: $R_1 = 2,938 \text{ Ohm}$, $C_1 = 17,53208 \text{ fF}$, $L_1 = 3,612 \text{ mH}$. Добротність Q розраховується з використанням виразу, наведеному в (4) і (5). У результаті отримуємо $Q = 154,493$.

Результати комп'ютерного моделювання підтвердили високу точність розробленої методики визначення параметрів ЕЕС п'єзореzonатора.

У таблиці 1 наведено порівняння параметрів ЕЕС, отриманих з використанням запропонованої методики та комп'ютерного моделювання, з еталонними даними від виробника.

Параметри ЕЕС п'єзореzonатора, які отримані за допомогою запропонованого методу, збігаються з даними, виміряними на професійному устаткуванні виробника. Максимальне відхилення параметрів не перевищує 0,0291%.

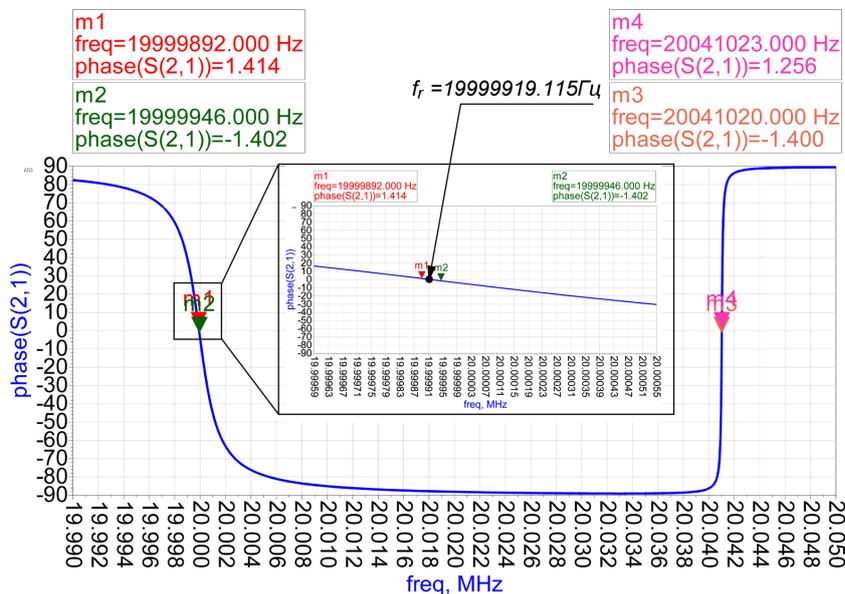


Рис. 4. Інвертована ФЧХ п'єзореzonатора PK459 для визначення f_r і f_a , що отримана за допомогою програмного пакета ADS

Таблиця 1

Зіставлення параметрів ЕЕС, які отримані запропонованою методикою, з даними виробника

| Параметри | Запропонована методика із використанням програми ADS | Вимірювання виробника | Відносна похибка визначення параметра, % |
|-------------------|--|-----------------------|--|
| $R_1(\text{Ohm})$ | 2,938 | 2,93798 | 0,00068 |
| $L_1(\text{mH})$ | 3,612 | 3,61305 | 0,0291 |
| $C_1(\text{fF})$ | 17,53208 | 17,52709 | 0,0285 |
| Q | 154493 | 154537,6 | 0,0289 |

Висновки. У даній роботі запропоновано нову методику визначення параметрів еквівалентної електричної схеми п'єзореzonаторів, яка заснована на фазовому методі вимірювання.

Основна перевага запропонованої методики полягає у виключенні з вимірювальної схеми додаткових зовнішніх пристроїв та відмові від використання наближених розрахункових співвідношень. У роботі застосовуються точні аналітичні вирази для визначення параметрів ЕЕС, що не ускладнює процес вимірювань, але підвищує точність.

Точність запропонованої методики підтверджена результатами комп'ютерного моделювання з використанням програмного продукту Advanced Design System (ADS), які демонструють значне наближення результатів до нормативних значень, наданих виробником, з максимальним відхиленням параметрів не більше 0,0291%.

Крім того, нова методика дозволяє використовувати доступне лабораторне обладнання, що знижує витрати на проведення вимірювань та робить методику більш доступною для широкого кола дослідників та інженерів. Це відкриває нові можливості для розробки та оптимізації мультифізичних датчиків, здатних одночасно вимірювати декілька фізичних величин із високою точністю у складних експлуатаційних умовах.

Подальші дослідження впливу мультифізичних впливів на чутливий елемент п'єзореzonансного датчика і, як наслідок, на параметри ЕЕС, сприятимуть створенню більш точних та надійних вимірювальних систем. Таким чином, запропонована методика вимірювання параметрів ЕЕС не тільки підвищує точність та ефективність вимірювань, а й розширює можливості застосування п'єзореzonансних датчиків у різних наукових та промислових галузях.

Список літератури:

1. Carta R., Turgis D., Hermans B., Jourand P., Onclin R., Puers R. A Differential Pressure Approach to Spirometry, 2007 IEEE Biomedical Circuits and Systems Conference. Pp. 5–8. Montreal, QC, Canada (2007).
2. Tomashevskiy R., Vasilchuk D. Primary Measuring Transducer of a Diagnostic Spirometer Based on a Venturi Flowmeter. 6th International Conference on Nanotechnologies and Biomedical Engineering. ICNBME 2023. IFMBE Proceedings, vol. 92, Springer, Cham.
3. Tomashevskiy R., Vasilchuk D., Romanusha V. Secondary Piezoresonance Transducer for Diagnostic Spirometer, 2023 IEEE 4th KhPI Week on Advanced Technology (KhPIWeek), Kharkiv, Ukraine, 2023. Pp. 1–4.
4. Avrunin O., Tomashevskiy R., Faruk H. Methods and means of functional diagnostics of external respiration. KhNADU, Kharkiv, 2015.
5. Zelenka J., Piezoelectric Resonators and their Applications (Studies in Electrical and Electronic Engineering). North-Holland, 1986
6. Rose D. Load resonant measurements of quartz crystals. Proceedings of the 45th Annual Symposium on Frequency Control 1991, Los Angeles, CA, USA, 1991. Pp. 191–200.
7. Li X., Kan E.C. A wireless low-range pressure sensor based on P(VDF-TrFE) piezoelectric resonance. *Sensors and Actuators. A: Physical.*, 2010, 163(2). Pp. 457–463.
8. Liu D., Xiao X., Tang Z., Chen Q., Li H., Wang X., Yan Y. Method for QCM Resonator Device Equivalent Circuit Parameter Extraction and Electrode Quality Assessment. *Micromachines (Basel)*. 2021 Sep. 9;12(9):1086.
9. Liu D., Huang X., Hu J., Tang Y., Wang Y. Measurement of quartz crystal unit parameters based on the precise derivation of zero phase frequency. *Electronics Letters*. 53(3). Pp.142–144.

Tomashevskiy R.S., Vasilchuk D.P., Zaluzhna H.V., Semenets D.A. METHOD FOR MEASURING PARAMETERS OF THE EQUIVALENT ELECTRICAL CIRCUIT OF A PIEZORESONANT SENSOR BASED ON ZERO PHASE FREQUENCY MEASUREMENTS

The article examines the methods of measuring the parameters of the equivalent electrical circuit (EEC) of piezo resonators. A new technique based on the phase measurement method is presented, which allows determining the parameters of the EEC with high accuracy.

Piezo-resonant sensors, which are produced in series, provide a limited set of output data, which includes only the resonant frequency, which is proportional to the measured value. However, the use of parameters of the equivalent electrical circuit (EEC) of the sensor as a source of information about the measured values allows obtaining a much wider range of data. This is especially important for the development of multiphysical sensors that can simultaneously measure several physical quantities and ensure high measurement accuracy in difficult operating conditions.

However, such multiphysics sensors require complex measurement methods, which leads to the need to use large computing power and expensive equipment. Standard methods of measuring EEC parameters using

laboratory equipment include separate measurements of parallel capacitance C_0 , dynamic resistance R_1 , as well as calculation of dynamic inductance L_1 and capacitance C_1 using approximate formulas.

This work presents a new method of measuring EEC parameters, which does not require additional external devices and is based on the use of available laboratory equipment. The proposed method is based on exact analytical expressions, which eliminates the need for approximate calculation methods. This greatly simplifies the measurement process, ensuring high accuracy of the results.

The accuracy of the proposed method is confirmed by the results of computer modeling using the Advanced Design System (ADS) software product. The obtained results showed a high correspondence with the reference values provided by the manufacturer, with a maximum deviation of the parameters of no more than 0,0291%.

Key words: *piezoresonant sensor; zero phase frequency, equivalent electrical circuit, model Butterworth – Van Dyke, vector network analyzer; P-shaped passive measuring quadripole.*

Відомості про авторів

Арінушкіна Н.С. – кандат технічних наук, доцент кафедри будівництва та експлуатації автомобільних доріг Харківського національного автомобільно-дорожнього університету

Арінушкіна О.О. – асистент кафедри будівництва та експлуатації автомобільних доріг Харківського національного автомобільно-дорожнього університету

Баюнов А.О. – магістр Національного університету кораблебудування імені адмірала Макарова

Беглов Я.І. – аспірант Національного університету «Одеська політехніка»

Беднарська І.С. – асистентка кафедри теплової та альтернативної енергетики Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Беднарська І.С. – асистентка кафедри теплової та альтернативної енергетики Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Биковець Н.П. – кандидат технічних наук, доцент, завідувачка кафедри управління в транспортній галузі Дунайського інституту Національного університету «Одеська морська академія»

Білий Р.Т. – викладач кафедри фізики та інформаційних систем Дрогобицького державного педагогічного університету імені Івана Франка

Бовсуновський А.П. – доктор технічних наук, професор, професор кафедри теплової та альтернативної енергетики Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Бовсуновський О.А. – кандидат технічних наук, м.н.с. відділу міцності матеріалів і елементів конструкцій за дії кріотермічних і електромагнітних чинників Інституту проблем міцності імені Г.С. Писаренка НАН України

Богза М.С. – аспірант кафедри автоматизації енергетичних процесів Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Бойко С.М. – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри транспортних технологій Національного університету «Запорізька політехніка»

Бурковський Я.Ю. – аспірант кафедри прикладної радіоелектроніки радіотехнічного факультету Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Бурчак П.В. – аспірант кафедри програмного забезпечення комп'ютерних систем Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Вакалюк Т.А. – доктор педагогічних наук, професор, завідувач кафедри інженерії програмного забезпечення Державного університету «Житомирська політехніка»

Вакась В.І. – кандидат технічних наук, провідний інженер Приватного акціонерного товариства «Київстар»

Василенко В.М. – аспірант кафедри інженерії програмного забезпечення Державного університету «Житомирська політехніка»

Васильсва Л.О. – кандидат технічних наук, доцент кафедри «Транспортні технології» Національного університету «Запорізька політехніка»

Васильчук Д.П. – старший викладач кафедри електромеханічних та комп'ютерних систем Бахмутського навчально-наукового професійно-педагогічного інституту Харківського національного університету імені В. Н. Каразіна

Вдовичин Т.Я. – кандидат педагогічних наук, доцент кафедри фізики та інформаційних систем Дрогобицького державного педагогічного університету імені Івана Франка

Волощук В.А. – доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри автоматизації енергетичних процесів Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Габовда О.В. – старший викладач кафедри інженерії, технологій та професійної освіти Мукачівського державного університету

Галай О.Ф. – магістр Таврійського національного університету імені В.І. Вернадського

Гапонова О.П. – доктор технічних наук, професор Сумського державного університету

Гідулян В.І. – здобувач кафедри комп'ютеризованих систем та програмних технологій Національного університету «Одеська політехніка»

Госовський Р.Р. – кандидат технічних наук, старший викладач Інституту хімії та хімічних технологій Національного університету «Львівська політехніка»

Грищенко Т.М. – старший викладач кафедри будівництва та експлуатації автомобільних доріг Харківського національного автомобільно-дорожнього університету

Гуйда О.Г. – кандидат наук з державного управління, доцент, завідувач кафедри комп'ютерних та інформаційних технологій Таврійського національного університету імені В.І. Вернадського

Гулько Є.В. – аспірант кафедри вагонів та вагонного господарства Державного університету інфраструктури та технологій

Гурч Л.М. – кандидат економічних наук, доцент кафедри транспортних систем та безпеки дорожнього руху Національного транспортного університету

Демішонкова С.А. – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри комп'ютерної інженерії та електромеханіки Київського національного університету технологій та дизайну

Довженко Д.В. – здобувачка освіти Національного університету кораблебудування імені адмірала Макарова

Душеба В.В. – кандидат технічних наук, доцент, завідувач відділом математичного та комп'ютерного моделювання Інституту проблем моделювання в енергетиці імені Г.Є. Пухова НАН України

Дроменко В.Б. – кандидат технічних наук, доцент кафедри інженерних систем та технологій Навчально-наукового інституту муніципального управління та міського господарства Таврійського національного університету імені В.І. Вернадського

Жуков О.А. – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри комп'ютеризовані електромеханічні системи та комплекси Вінницького національного технічного університету

Заболотний О.В. – доктор технічних наук, професор, декан факультету №3 Національного аерокосмічного університету імені М.Є. Жуковського «Харківський авіаційний інститут»

Заїченко В.Д. – студент кафедри конструювання електронно-обчислювальної апаратури Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Зайко Т.А. – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри програмних засобів Національного університету «Запорізька політехніка»

Залужна Г.В. – кандидат фізико-математичних наук, доцент кафедри електромеханічних та комп'ютерних систем Бахмутського навчально-наукового професійно-педагогічного інституту Харківського національного університету імені В. Н. Каразіна

Зилевіч М.О. – доктор філософії, асистент кафедри конструювання електронно-обчислювальної апаратури Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Зінковський Ю.Ф. – доктор технічних наук, професор, академік НАН України, професор кафедри прикладної радіоелектроніки радіотехнічного факультету Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Злотенко Б.М. – доктор технічних наук, професор, декан факультету мехатроніки та комп'ютерних технологій Київського національного університету технологій та дизайну

Луца А.С. – аспірант кафедри комп'ютеризованих систем та програмних технологій Національного університету «Одеська політехніка»

Казмиренко Ю.О. – докторка технічних наук, доцентка, професорка кафедри матеріалознавства і технології металів Національного університету кораблебудування імені адмірала Макарова

Карпенко М.І. – аспірант кафедри автоматизації та комп'ютерних технологій систем управління імені професора А.П. Ладанюка Національного університету харчових технологій

Кириченко О.Л. – доктор філософії, асистент кафедри математичних проблем управління і кібернетики Чернівецького національного університету імені Юрія Федьковича

Кисіль А.Ю. – аспірант кафедри комп'ютерних інформаційних систем і технологій Інституту комп'ютерно-інформаційних технологій та дизайну ПрАТ «Вищий навчальний заклад «Міжрегіональна Академія управління персоналом»

Кіндзера Д.П. – кандидат технічних наук, доцент, доцент Інституту хімії та хімічних технологій Національного університету «Львівська політехніка».

Коваль А.М. – кандидат технічних наук, старший викладач кафедри комп'ютеризовані електромеханічні системи та комплекси Вінницького національного технічного університету

Козинка О.С. – аспірант кафедри «Вагони та вагонне господарство» Державного університету інфраструктури та технологій

Коновалов О.Ю. – кандидат технічних наук, старший викладач Київського фахового коледжу зв'язку

Коновалюк О.Л. – аспірант кафедри теплової та альтернативної енергетики Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Кононова І.В. – кандидат технічних наук, доцент, завідувач спеціальної кафедри № 4 Інституту спеціального зв'язку та захисту інформації Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Коробкова О.М. – кандидат економічних наук, доцент кафедри «Експлуатація портів і технологія вантажних робіт» Одеського національного морського університету

Корчинський В.М. – доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри телекомунікаційних систем та мереж Дніпровського національного університету імені Олеся Гончара

Костін Д.Ю. – кандидат технічних наук, доцент кафедри будівництва та експлуатації автомобільних доріг Харківського національного автомобільно-дорожнього університету

Котов О.Б. – доктор технічних наук, професор, професор кафедри транспортних технологій Національного університету «Запорізька політехніка»

Кримська А.О. – кандидат технічних наук, старший викладач кафедри менеджменту, маркетингу і міжнародної логістики Чернівецького торговельно-економічного інституту Державного торговельно-економічного університету

Кузьменко О.В. – старший викладач кафедри комп'ютерних наук Державного університету «Житомирська політехніка»

Лісничий В.С. – аспірант кафедри «Вагони та вагонне господарство» Державного університету інфраструктури та технологій

Лісовець С.М. – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри інженерних систем та технологій Навчально-наукового інституту муніципального управління та міського господарства Таврійського національного університету імені В.І. Вернадського

Лапіна О.С. – т.в.о. заступника директора з авіаційної безпеки ТОВ «ЕЙР ТАУРУС»

Лебедева Н.Ю. – кандидатка технічних наук, доцентка, доцентка кафедри матеріалознавства і технології металів Національного університету кораблебудування імені адмірала Макарова

Левківський В.Л. – доктор філософії з інженерії програмного забезпечення доцент кафедри комп'ютерних наук Державного університету «Житомирська політехніка»

Легеца В.П. – доктор технічних наук, професор, професор кафедри програмного забезпечення комп'ютерних систем факультету прикладної математики Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Лисенко О.І. – доктор технічних наук, професор кафедри телекомунікацій Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Майструк В.О. – студент 4 курсу кафедри транспортних систем та безпеки дорожнього руху Національного транспортного університету

Манько О.О. – доктор технічних наук, професор, завідувач навчально-методичної лабораторії Київського фахового коледжу зв'язку

Марчук Д.К. – старший викладач кафедри комп'ютерних наук Державного університету «Житомирська політехніка»

Мельник Л.І. – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри хімічної технології композиційних матеріалів Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Мошенський А.О. – доцент кафедри інформаційних технологій штучного інтелекту і кіберзахисту Національного університету харчових технологій

Некрутенко В.І. – заступник завідувача Спеціальної кафедри № 2 Інституту спеціального зв'язку та захисту інформації Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Нещадим О.М. – кандидат фізико-математичних наук, доцент, доцент кафедри програмного забезпечення комп'ютерних систем факультету прикладної математики Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Ніжник В.В. – доктор технічних наук, професор, начальник науково-дослідного центру протипожежного захисту Інституту державного управління та наукових досліджень з цивільного захисту

Нікіфоренко К.Б. – кандидат технічних наук, старший викладач Київського фахового коледжу зв'язку

Нікулін С.С. – аспірант кафедри № 303 Національного аерокосмічного університету імені М.С. Жуковського «Харківський авіаційний інститут»

Носаль О.Ю. – аспірант кафедри теплової та альтернативної енергетики Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Олещенко Л.М. – кандидат технічних наук, доцент кафедри програмного забезпечення комп'ютерних систем Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Острогляд О.О. – кандидат технічних наук, доцент кафедри «Транспортні технології» Національного університету «Запорізька політехніка»

Павленко В.Д. – доктор технічних наук, професор, професор кафедри комп'ютеризованих систем та програмних технологій Національного університету «Одеська політехніка»

Павловська Л.А. – кандидат економічних наук, доцент, професор кафедри «Експлуатація портів і технологія вантажних робіт» Одеського національного морського університету

Павлюк С.К. – аспірант кафедри технологій природних і синтетичних полімерів, жирів та харчової продукції Українського державного університету науки і технологій

Пазюк Р.І. – кандидат фізико-математичних наук, доцент кафедри фізики та інформаційних систем Дрогобицького державного педагогічного університету імені Івана Франка

Панаріна І.В. – кандидат технічних наук, доцент кафедри комп'ютерних наук Державного університету «Житомирська політехніка»

Панченко К.А. – магістрант кафедри теплової та альтернативної енергетики Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Пахомова В.М. – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри електронних обчислювальних машин Українського державного університету науки і технологій

Петросян Р.В. – старший викладач кафедри комп'ютерних наук Державного університету «Житомирська політехніка»

Пешко В.А. – кандидат технічних наук, доцент кафедри теплової та альтернативної енергетики Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Пілічева М.О. – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри проектування доріг, геодезії і землеустрою Харківського національного автомобільно-дорожнього університету

Поліщук М.М. – доктор технічних наук, доцент, професор кафедри інформаційних систем та технологій Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Прокопенко П.М. – доктор філософії, начальник науково-дослідного відділу динаміки та міцності філії «Науково-дослідний та конструкторсько-технологічний інститут залізничного транспорту» АТ «Укрзалізниця»

Пундик В.І. – аспірант кафедри комп'ютерної інженерії Тернопільського національного технічного університету імені Івана Пулюя

Регада В.О. – магістр з фінансів і кредиту Харківського національного економічного університету імені Семена Кузнеця

Регада Ю.О. – магістр в галузі програмування, факультет комп'ютерних та інформаційних технологій Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут»

Риженко М.С. – здобувачка освіти Національного університету кораблебудування імені адмірала Макарова

Риков Г.Ю. – старший викладач кафедри електротехніки Кременчуцького національного університету імені Михайла Остроградського

Риндюк Д.В. – кандидат технічних наук, доцент кафедри теплової та альтернативної енергетики Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Ролік О.І. – доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри інформаційних систем та технологій Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Романюк В.А. – кандидат технічних наук, доцент кафедри забезпечення державної безпеки Національної академії Національної гвардії України

Савченко О.В. – старший науковий співробітник відділу досліджень, статистики пожеж та надзвичайних ситуацій науково-дослідного центру протипожежного захисту Інституту державного управління та наукових досліджень з цивільного захисту

Савченко Т.О. – магістр Інституту державного управління та наукових досліджень з цивільного захисту

Свідерський В.А. – доктор технічних наук, професор, професор кафедри хімічної технології композиційних матеріалів Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Семенець Д.А. – кандидат технічних наук, доцент кафедри електромеханічних та комп'ютерних систем Бахмутського навчально-наукового професійно-педагогічного інституту Харківського національного університету імені В. Н. Каразіна

Сікора О.В. – кандидат технічних наук, доцент кафедри фізики та інформаційних систем Дрогобицького державного педагогічного університету імені Івана Франка

Сірий О.А. – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри теплової та альтернативної енергетики Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Сіроклин В.П. – кандидат технічних наук, доцент, завідувач кафедри № 303 Національного аерокосмічного університету імені М.Є. Жуковського «Харківський авіаційний інститут»

Скрупський С.Ю. – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри комп'ютерних систем та мереж Національного університету «Запорізька політехніка»

Соломчак А.О. – аспірант кафедри інформаційно-телекомунікаційних технологій та систем Івано-Франківського національного технічного університету нафти і газу

Соломчак О.В. – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри електроенергетики, електротехніки та електромеханіки Івано-Франківського національного технічного університету нафти і газу

Сотніченко Ю.О. – викладач вищої категорії Київського фахового коледжу зв'язку

Старіков Д.І. – здобувач ступеню «бакалавр» спеціальності «Комп'ютерна інженерія» Українського державного університету науки і технологій

Стародубцев С.О. – кандидат військових наук, доцент кафедри забезпечення державної безпеки Національної академії Національної гвардії України

Стаценко В.В. – доктор технічних наук, доцент, професор кафедри комп'ютерної інженерії та електромеханіки Київського національного університету технологій та дизайну

Стаценко Д.В. – кандидат технічних наук, доцент, завідувач кафедри комп'ютерної інженерії та електромеханіки Київського національного університету технологій та дизайну

Сунь Д. – аспірант кафедри будівництва та експлуатації автомобільних доріг Харківського національного автомобільно-дорожнього університету

Суша І.В. – кандидат технічних наук, доцент кафедри технологій природних і синтетичних полімерів, жирів та харчової продукції Українського державного університету науки і технологій

Тарахтій О.С. – кандидат технічних наук, доцент кафедри проґраних та комп'ютерно-інтегрованих технологій Національного університету «Одеська політехніка»

Тарновецька О.Ю. – кандидат фізико-математичних наук, асистент, асистент кафедри програмного забезпечення комп'ютерних систем Чернівецького національного університету імені Юрія Федьковича

Тачинина О.М. – доктор технічних наук, доцент кафедри аерокосмічних систем керування факультету аеронавігації, електроніки та телекомунікацій Національного авіаційного університету

Тетера В.С. – аспірант кафедри будівництва та експлуатації автомобільних доріг Харківського національного автомобільно-дорожнього університету

Тарельник Н.В. – кандидат економічних наук, доцент Сумського національного аграрного університету

Томашевський Р.С. – доктор технічних наук, професор, професор кафедри промислової і біомедичної електроніки Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут»

Третяк В.І. – провідний фахівець відділу аспірантури Національного університету «Запорізька політехніка»

Турпак С.М. – доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри «Транспортні технології» Національного університету «Запорізька політехніка»

Федорук Р.О. – магістрант кафедри теплової та альтернативної енергетики Національного технічного університету «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Фомін О.В. – доктор технічних наук, професор, професор кафедри «Вагони та вагонне господарство» Державного університету інфраструктури та технологій

Фоміна А.М. – доктор філософії, науковий співробітник Східноукраїнського національного університету імені Володимира Даля

Фролова Л.А. – доктор технічних наук, професор кафедри технології неорганічних речовин та екології Навчально-наукового інституту «Український державний хіміко-технологічний університет» Українського державного університету науки і технологій

Фролов О.О. – магістр кафедри технології неорганічних речовин та екології Навчально-наукового інституту «Український державний хіміко-технологічний університет» Українського державного університету науки і технологій

Фуртат О.В. – старший викладач кафедри автоматизованого управління технологічними процесами Таврійського національного університету імені В.І. Вернадського

Фуртат С.О. – старший викладач кафедри автоматизованого управління технологічними процесами Таврійського національного університету імені В.І. Вернадського

Харлай Л.О. – кандидат технічних наук, доцент, викладач-методист вищої категорії Київського фахового коледжу зв'язку

Харченко Т.В. – старший викладач кафедри «Транспортні технології» Національного університету «Запорізька політехніка»

Хамбір В.Р. – магістр, головний інженер-програміст CapitalOne

Чумаченко С.М. – державний експерт служби з питань екологічної та енергетичної безпеки апарата РНБО України

Шахбазов І.О. – аспірант 1 курсу групи ТУ-31ф кафедри теплової та альтернативної енергетики Навчально-наукового інституту атомної та теплової енергетики Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Шелешей Т.В. – кандидат технічних наук, старший викладач кафедри теплової та альтернативної енергетики Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Шкарупило В.В. – аспірант кафедри програмних засобів Національного університету «Запорізька політехніка»

Шкарупило В.В. – кандидат технічних наук, доцент, старший науковий співробітник, доцент кафедри комп'ютерних систем, мереж та кібербезпеки Національного університету біоресурсів і природокористування України, Інституту проблем моделювання в енергетиці імені Г.Є. Пухова НАН України

Шпак Н.Г. – кандидат економічних наук, доцент, доцент кафедри «Експлуатація портів і технологія вантажних робіт» Одеського національного морського університету

НОТАТКИ

Науковий журнал

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

Серія: Технічні науки

Том 35 (74) № 4 2024

Коректура • *Н. Славогородська*

Комп'ютерна верстка • *Н. Кузнєцова*

Адреса редакції:

Таврійський національний університет імені В.І. Вернадського

м. Київ, вул. Джона Маккейна, 33

Електронна пошта: editor@tech.vernadskyjournals.in.ua

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

Формат 60×84/8. Гарнітура Times New Roman.

Папір офсетний. Цифровий друк. Обл.-вид. арк. 44,18. Ум. друк. арк. 33,02. Зам. № 0924/629.

Підписано до друку 31.08.2024. Наклад 150 прим.

Видавництво і друкарня – Видавничий дім «Гельветика»

65101, м. Одеса, вул. Інглезі, 6/1

Телефони: +38 (095) 934 48 28, +38 (097) 723 06 08

E-mail: mailbox@helvetica.ua

Свідоцтво суб'єкта видавничої справи

ДК № 7623 від 22.06.2022 р.