

**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) № 5 2024

Частина 1



Видавничий дім
«Гельветика»
2024

Головний редактор:

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

Члени редакційної колегії:

Медведєв Микола Георгійович (відповідальний секретар) – доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри загальноінженерних дисциплін та теплоенергетики Таврійського національного університету імені В.І. Вернадського;

Бронін Сергій Вадимович – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри інформаційних систем та технологій Київського національного університету імені Тараса Шевченка;

Домніч Володимир Іванович – кандидат технічних наук, професор, завідувач кафедри автоматизованого управління технологічними процесами Таврійського національного університету імені В.І. Вернадського;

Дехтяр Анатолій Соломонович – доктор технічних наук, професор, професор кафедри архітектурних конструкцій Національної академії образотворчого мистецтва і архітектури;

Дичко Аліна Олегівна – доктор технічних наук, професор, професор кафедри загальноінженерних дисциплін та теплоенергетики Таврійського національного університету імені В.І. Вернадського;

Дубко Валерій Олексійович – доктор фізико-математичних наук, професор, професор кафедри вищої математики Київського національного університету технологій та дизайну;

Єремєєв Ігор Семенович – доктор технічних наук, професор, професор кафедри автоматизованого управління технологічними процесами Таврійського національного університету імені В.І. Вернадського;

Лисенко Олександр Іванович – доктор технічних наук, професор, професор кафедри телекомунікацій Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Огородник Станіслав Станіславович – доктор технічних наук, старший науковий співробітник, професор кафедри загальноінженерних дисциплін та теплоенергетики Таврійського національного університету імені В.І. Вернадського;

Сегай Олександр Михайлович – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри загальноінженерних дисциплін та теплоенергетики Таврійського національного університету імені В.І. Вернадського;

Чумаченко Сергій Миколайович – доктор технічних наук, старший науковий співробітник, завідувач кафедри інформаційних систем Національного університету харчових технологій;

Цомко Олена – доктор філософії по спеціальності «Безпека і управління інформацією», відділення комп'ютерної інженерії, Інститут Міжнародної освіти, Університет Донгсо, Республіка Корея.

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

**Рекомендовано до друку та поширення через мережу Internet
Вченою радою Таврійського національного університету імені В.І. Вернадського
(протокол № 4 від 07.11.2024 року)**

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

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

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

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

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

ISSN 2663-5941 (Print)

ISSN 2663-595X (Online)

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

ЗМІСТ

ОБРОБКА МАТЕРІАЛІВ У МАШИНОБУДУВАННІ

Бернацький А.В., Юрченко Ю.В., Сіора О.В., Соколовський М.В., Сіора І.В. ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ ЛАЗЕРНОГО ВИПРОМІНЮВАННЯ НА СКЛОВІСНІ КОМПОЗИТНІ МАТЕРІАЛИ.....	1
---	---

АВІАЦІЙНА ТА РАКЕТНО-КОСМІЧНА ТЕХНІКА

Стратонов В.М., Юрченко Д.С. АНАЛІЗ БЕЗПЕКОВОГО СТАНУ ЦИВІЛЬНОЇ АВІАЦІЇ: РИЗИКИ ВЕРБУВАННЯ ТА ПІДКУПУ СПІВРОБІТНИКІВ СЛУЖБИ АВІАЦІЙНОЇ БЕЗПЕКИ.....	9
---	---

ЕЛЕКТРОТЕХНІКА

Білевська О.С. ГНУЧКІ ДРУКОВАНІ ПЛАТИ. АНАЛІЗ СУЧАСНИХ МОЖЛИВОСТЕЙ.....	15
Гарист А.В. ТЕХНОЛОГІЯ АВТОМАТИЧНОГО МОНТАЖУ ДРУКОВАНИХ ПЛАТ.....	20

ПРИЛАДИ

Прокопченко С.В. ПРАКТИЧНА ОЦІНКА МІЖКАЛІБРУВАЛЬНОГО ІНТЕРВАЛУ ВИПРОБУВАЛЬНОГО ОБЛАДНАННЯ.....	25
--	----

РАДІОТЕХНІКА ТА ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЇ

Загреба А.Я., Лебедев Д.Ю. РЕАЛІЗАЦІЯ ПРОГРАМНОГО ЗАСТОСУНКУ ДЛЯ ОЦІНКИ АУДІТИВНОГО СПРИЙНЯТТЯ У КОРИСТУВАЧІВ.....	31
Катін П.Ю., Мішин О.В. МЕТОДИКА ДЛЯ СПРОЩЕННЯ АНАЛІТИЧНОГО РОЗРАХУНКУ СПЕКТРУ СКЛАДНИХ ІМПУЛЬСНИХ СИГНАЛІВ В СИСТЕМАХ РАДІОКЕРУВАННЯ	38
Мадінов М.Л. ДОСЛІДЖЕННЯ НЕЛІНІЙНИХ ЕФЕКТІВ, ЩО ВИНИКАЮТЬ ПРИ РОЗПОВСЮДЖЕННІ СОЛІТОНІВ В ВОЛОКОННО-ОПТИЧНИХ СИСТЕМАХ ПЕРЕДАЧІ.....	45
Маруняк С.Т. ПІДВИЩЕННЯ ІНФОРМАЦІЙНОЇ БЕЗПЕКИ В ПРОТОКОЛАХ ДИНАМІЧНОЇ МАРШРУТИЗАЦІЇ ЗА ДОПОМОГОЮ МАШИННОГО НАВЧАННЯ З ВИКОРИСТАННЯМ НАЇВНОГО КЛАСИФІКАТОРА БАЙЄСА.....	51
Мустафаєв О.В. СУЧАСНІ ТЕХНОЛОГІЇ ЗАХИСТУ ВІД GPS СПУФІНГУ У СИСТЕМАХ НАВІГАЦІЇ.....	58
Соколов К.А., Жук С.Я. АДАПТИВНИЙ АЛГОРИТМ КОРЕЛЯЦІЙНОГО СТЕЖЕННЯ ЗА МАЛОРОЗМІРНИМ БПЛА....	62
Сушин І.О., Лисенко О.І. ОЦІНКА ЕФЕКТИВНОСТІ МЕТОДУ ПІДТРИМКИ ЗВ'ЯЗНОСТІ МОБІЛЬНОЇ МЕРЕЖІ СЕНСОРІВ СПРЯМОВАНОЇ ДІЇ ІЗ ВИКОРИСТАННЯМ ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙНИХ АЕРОПЛАТФОРМ РІЗНОРІВНЕВОГО РОЗТАШУВАННЯ.....	71
Шевцов К.О., Живков О.П. ПРЯМОКУТНІ МІКРОСТРІЧКОВІ РЕЗОНАТОРИ ЯК ЕЛЕМЕНТ РЕКТЕН ТА ЇХ МЕТАМАТЕРІАЛЬНІ ВЛАСТИВОСТІ.....	79

ІНФОРМАТИКА, ОБЧИСЛЮВАЛЬНА ТЕХНІКА ТА АВТОМАТИЗАЦІЯ

Богдан Г.А., Глушенко М.О. ГАЗОВІ СЕНСОРИ: СУЧАСНИЙ СТАН ТА ПЕРСПЕКТИВИ.....	85
---	----

Волк М.О., Бугрій А.М., Ковтун Є.І., Брестовицький Р.М., Соробей Б.В., Лобач Я.В. ОПТИМІЗАЦІЯ РЕСУРСІВ У ХМАРНИХ ОБЧИСЛЕННЯХ: ГІБРИДНИЙ ПІДХІД ДО АВТОМАТИЗАЦІЇ ОПЕРАЦІЙ ТА ЕНЕРГОЗБЕРЕЖЕННЯ.....	91
Волошин В.С., Опанасюк М.Ю. ІННОВАЦІЙНІ ПІДХОДИ ДО РОЗРОБКИ СЕРВЕРНОЇ ЧАСТИНИ WEB-ЗАСТОСУНКУ КОНТРОЛЮ БЮДЖЕТУ ДОМОГОСПОДАРСТВА З ВИКОРИСТАННЯМ EXPRESS.....	97
Геращенко О.О., Новіков П.В. АВТОМАТИЗАЦІЯ СИСТЕМИ ВЕНТИЛЯЦІЇ ЧИСТИХ ПРИМІЩЕНЬ З ВИКОРИСТАННЯМ МЕТОДІВ МАШИННОГО НАВЧАННЯ.....	102
Головка І.Г., Савенко О.С., Медзатий Д.М., Іванченко О.В. МЕТОДИ ОБФУСКАЦІЇ ПРОГРАМНОГО КОДУ ЗА ДОПОМОГОЮ ШТУЧНОГО ІНТЕЛЕКТУ.....	115
Денисюк Д.О., Савенко Б.О., Каштальян А.С., Іванченко О.В. МЕТОД ВИЯВЛЕННЯ ЗЛОВМИСНОГО ПРОГРАМНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ НА ОСНОВІ АНАЛІЗУ ПОВЕДІНКОВИХ ПАТЕРНІВ СИСТЕМИ.....	124
Дереза А.Ю. ПРАКТИЧНЕ НАВЧАННЯ ТА СТАЖУВАННЯ СТУДЕНТІВ У ІТ-КОМПАНІЯХ: МОДЕЛІ ВЗАЄМОДІЇ МІЖ ВУЗАМИ ТА ІНДУСТРІЄЮ.....	130
Завгородній В.В., Завгородня Г.А., Васильєв С.В., Прусов В.О. РОЗРОБКА МЕТОДОЛОГІЇ ДЛЯ АНОНІМНОСТІ КОРИСТУВАЧІВ ТА ПРОТИДІЇ ВІДСТЕЖЕННЮ ОНЛАЙН.....	137
Зозуля В.А., Осадчий С.І. АЛГОРИТМИ ЗВЕДЕННЯ ОДНОКОНТУРНОЇ БАГАТОВИМІРНОЇ СЛІДКУВАЛЬНОЇ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ ДО ЕКВІВАЛЕНТНИХ СИСТЕМ СТАБІЛІЗАЦІЇ.....	143
Іванишин В.В., Мошенский А.О. КОНЦЕПЦІЯ АВТОМАТИЗОВАНОЇ СИСТЕМИ МОНІТОРИНГУ ПАСІКИ НА ОСНОВІ ТЕХНОЛОГІЇ LORA З ВИКОРИСТАННЯМ СЕНСОРІВ РЕАЛЬНОГО ЧАСУ.....	149
Карпенко М.І., Чумаченко С.М., Мошенський А.О., Гуйда О.Г. АРГУМЕНТАЦІЯ ЕФЕКТИВНОСТІ АЛЬТЕРНАТИВНИХ ЗАСОБІВ МОНІТОРИНГУ НА ПРИКЛАДІ MESHTASTIC ТА APRS.....	154
Короленко Я.Р., Павловська Ю.О. МОДЕЛЮВАННЯ РУХУ КРОКУЮЧОГО РОБОТА З НЕСПРАВНОЮ КІНЦІВКОЮ В СЕРЕДОВИЩІ MATLAB.....	161
Лисенко О.І., Тачинина О.М., Пономаренко С.О., Фуртат О.В., Гетьман О.В., Подобєд В.В. МЕТОДИКА СИНТЕЗУ РЕГУЛЯРНОГО СПОСТЕРІГАЧА СТАНУ ДЛЯ ЦИФРОВИХ РЕГУЛЯТОРІВ ЕЛЕКТРОПРИВОДІВ НЕСУЧИХ ГВИНТІВ МАЛОЇ ЦИВІЛЬНОЇ АВІАЦІЇ.....	170
Лисюк Г.П. СИНТЕЗ СИСТЕМИ УПРАВЛІННЯ ТЕПЛОВИМ НАВАНТАЖЕННЯМ БАРАБАННОГО КОТЛА ПРИ СПАЛЮВАННІ ТВЕРДИХ ПОБУТОВИХ ВІДХОДІВ.....	178
Маринич І.А., Макогонов А.В. ВИЯВЛЕННЯ БПЛА НА ОСНОВІ ТЕХНОЛОГІЙ МАШИННОГО ЗОРУ.....	188
Мельниченко Д.В., Вакалюк Т.А., Фаррахов О.В., Кот Н.С. АНАЛІЗ ЗАСОБІВ РЕАЛІЗАЦІЇ ВЕБЗАСТОСУНКУ ДЛЯ КЕРУВАННЯ РОБОЧИМ ЧАСОМ.....	197
Мовчан К.О. СУЧАСНІ СТРАТЕГІЇ НАВІГАЦІЇ ДРОНІВ У ВИПАДКАХ ВІДСУТНОСТІ GPS СИГНАЛУ.....	203
Назарова С.О., Назаров Д.Л. ТЕХНОЛОГІЯ РОЗРОБКИ ПРОГРАМНОГО ІНСТРУМЕНТАРІЮ ДЛЯ УПРАВЛІННЯ ДИСТАНЦІЙНОЮ ТРУДОВОЮ ДІЯЛЬНІСТЮ ВИКОНАВЦІВ ІТ-ПРОЄКТІВ.....	211
Нечипоренко В.А. МЕТОДИ КЕРУВАННЯ БПЛА ІЗ ЗАСТОСУВАННЯМ КОМП'ЮТЕРНОГО ЗОРУ.....	217
Новак Д.С., Олещенко Л.М., Василенко В.М., Гуйда О.Г., Омечинська Н.В. РОЗРОБКА ПРОГРАМНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ДЛЯ РОЗПІЗНАВАННЯ СИМВОЛІВ КРЕДИТНИХ КАРТОК МОВОЮ PYTHON.....	226

Palonyi A.S., Nechypurenko A.G. MODELLING THE DYNAMICS OF OCCUPATIONAL STRESS IN AIR TRAFFIC CONTROL.....	231
Панаскін Д.В. ЗАСТОСУВАННЯ МЕТОДІВ АУГМЕНТАЦІЇ CVAE ДЛЯ ПОКРАЩЕННЯ НАВЧАННЯ НЕЙРОННИХ МЕРЕЖ В АНАЛІЗІ ЛЕГЕНЕВИХ ЗВУКІВ.....	240
Пацьора А.А. МОДЕЛІ ТА ІНФОРМАЦІЙНА ТЕХНОЛОГІЯ АДАПТАЦІЇ ОСВІТНЬОГО ПРОЦЕСУ ДО WEB 3.0.....	246
Повхан І.Ф., Сароз В.Я., Лєгеца А.В. МОДИФІКОВАНИЙ МЕТОД ДЕРЕВА АЛГОРИТМІВ ДРУГОГО ТИПУ В ЗАДАЧАХ КЛАСИФІКАЦІЇ.....	254
Прокоф'єв І.Г., Савенко О.С., Медзатий Д.М. МЕТОД СТАТИСТИЧНОГО АНАЛІЗУ ПРОГРАМНОГО КОДУ ВИКОРИСТОВУЮЧИ КОМПЛЕКСНІ ПАРАМЕТРИ.....	262
Самофалов А.В., Терейковський І.А. КОНЦЕПТУАЛЬНА МОДЕЛЬ ФОРМУВАННЯ ВЕБ-ОРІЄНТОВАНИХ БАЗ ДАНИХ ЕМОЦІЙНО ЗАБАРВЛЕНИХ ГОЛОСОВИХ СИГНАЛІВ.....	270
Сельоткін В.О., Волощук В.А. АВТОМАТИЗОВАНІ СИСТЕМИ ОПТИЧНОЇ ПЕРЕВІРКИ ДРУКОВАНИХ ПЛАТ. ОГЛЯД ТЕХНОЛОГІЙ.....	275
Скулиш М.А., Дмитренко О.А. МЕТОД ОРГАНІЗАЦІЇ МІКРОСЕРВІСІВ НА СЕРВЕРНИХ ГРУПАХ KUBERNETES.....	291
Слабінога М.О., Бойчук Т.В. АВТОМАТИЗОВАНА СИСТЕМА ОБЛІКУ КОМП'ЮТЕРНОЇ ТЕХНІКИ УНІВЕРСИТЕТУ ЯК СКЛАДОВА ЄДИНОЇ УНІВЕРСИТЕТСЬКОЇ ІНФОРМАЦІЙНОЇ СИСТЕМИ.....	298
Стьопкін А.В. АЛГОРИТМ РОЗПІЗНАВАННЯ ПРОСТИХ НЕОРІЄНТОВАНИХ ГРАФІВ КОЛЕКТИВОМ АГЕНТІВ.....	303
Тарасенко М.М., Николайчук М.Я. РОЗРОБКА І ТЕСТУВАННЯ АЛГОРИТМІВ ДИСТАНЦІЙНОГО ОПОВІЩЕННЯ ОПЕРАТОРІВ ГАЗОРОЗПОДІЛЬНИХ СТАНЦІЙ З ФУНКЦІЯМИ АВАРІЙНОЇ СИГНАЛІЗАЦІЇ НА ОСНОВІ GSM-КОМУНІКАЦІЇ.....	310
Турчин О.Б. ПРОГНОЗУВАННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ГНШУ НА ОСНОВІ ДАНИХ RFID ТА МЕТОДІВ МАШИННОГО НАВЧАННЯ.....	321
Фокін А.І. МЕТОДИ ТА ЗАСОБИ ОПТИМІЗАЦІЇ ВИРОБНИЦТВА ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ МАЛИМИ ГІДРОЕЛЕКТРОСТАНЦІЯМИ.....	328
Черняк І.О. ДОСЛІДЖЕННЯ МОЖЛИВОСТЕЙ МОДЕЛІ DISTILBERT ДЛЯ ПОДАЛЬШОГО ВИКОРИСТАННЯ В СИСТЕМІ АВТОМАТИЗАЦІЇ ЕЛЕКТРОННОГО ДОКУМЕНТООБИГУ.....	337
Шевцов І.О. ГІБРИДНІ МОДЕЛІ ОБЧИСЛЕНЬ FOG І EDGE ДЛЯ ОПТИМІЗАЦІЇ ВІДДАЛЕНОГО МОНІТОРИНГУ ХРОНІЧНИХ ЗАХВОРЮВАНЬ.....	343
ХІМІЧНІ ТЕХНОЛОГІЇ	
Іванченко А.В., Воронов В.В. АДСОРБЦІЙНЕ ВИЛУЧЕННЯ ФОСФАТІВ ТА ПОВЕРХНЕВО-АКТИВНИХ РЕЧОВИН З РІДКИХ ВІДХОДІВ ХІМІЧНО МОДИФІКОВАНИМ ЦЕОЛІТОМ.....	354
ВІДОМОСТІ ПРО АВТОРІВ.....	360

CONTENTS

MATERIAL PROCESSING IN MECHANICAL ENGINEERING

Bernatskyi A.V., Yurchenko Yu.V., Siora O.V., Sokolovskyi M.V., Siora I.V.

STUDY OF THE EFFECT OF LASER RADIATION ON GLASS-CONTAINING COMPOSITE MATERIALS.....1

AIRCRAFT AND AEROSPACE TECHNIQUES

Stratonov V.M., Yurchenko D.S.

ANALYSIS OF THE SECURITY STATE OF CIVIL AVIATION: RISKS OF RECRUITMENT AND BRIBERY OF AVIATION SECURITY SERVICE EMPLOYEES9

ELECTRICAL ENGINEERING

Bilevska O.S.

FLEXIBLE PRINTED BOARDS. ANALYSIS OF CURRENT OPPORTUNITIES.....15

Haryst A.V.

AUTOMATION ASSEMBLY TECHNOLOGY PRINTED CIRCUIT BOARDS.....20

EQUIPMENT

Prokopchenko S.V.

PRACTICAL EVALUATION OF THE INTERCALIBRATION INTERVAL OF THE TEST EQUIPMENT.....25

RADIO ENGINEERING AND TELECOMMUNICATIONS

Zagreba A.Ya., Lebedev D.Yu.

IMPLEMENTATION OF A SOFTWARE APPLICATION FOR ASSESSING AUDITORY PERCEPTION IN USERS..... 31

Katin P.Yu. Mishyn O.V.

METHODOLOGY FOR SIMPLIFYING THE ANALYTICAL CALCULATION OF THE SPECTRUM OF COMPLEX PULSE SIGNALS IN RADIO CONTROL SYSTEMS.....38

Madinov M.L.

STUDY OF NONLINEAR EFFECTS OF THE PROPAGATION OF SOLITONS IN FIBER-OPTIC TRANSMISSION SYSTEMS..... 45

Maruniak S.T.

ENHANCING INFORMATION SECURITY IN DYNAMIC ROUTING PROTOCOLS WITH THE HELP OF MACHINE LEARNING USING A NAIVE BAYES CLASSIFIER..... 51

Mustafaiev O.V.

MODERN TECHNOLOGIES OF PROTECTION AGAINST GPS SPOOFING IN NAVIGATION SYSTEMS.....58

Sokolov K.A., Zhuk S.Ya.

ADAPTIVE CORRELATION ALGORITHM FOR TRACKING SMALL UAVS.....62

Sushyn I.O., Lysenko O.I.

EVALUATION OF METHOD EFFECTIVENESS FOR MAINTAINING CONNECTIVITY IN A MOBILE NETWORK WITH DIRECTED ACTION SENSORS USING TELECOMMUNICATION AERIAL PLATFORMS AT DIFFERENT LOCATION LEVELS.....71

Shevtsov K.O., Zhivkov O.P.

RECTANGULAR MICROSTRIP RESONATORS AS A RECTENNA ELEMENT AND THEIR METAMATERIAL PROPERTIES.....79

INFORMATICS, COMPUTER ENGINEERING AND AUTOMATION

Bohdan H.A., Hlushchenko M.O.

CURRENT STATUS AND FUTURE PROSPECTS OF GAS SENSORS.....85

Volk M.O., Buhrii A.M., Kovtun Ye.I., Brestovytskyi R.M., Sorobey B.V., Lobach Ya.V. MODELS OPTIMIZATION OF RESOURCES IN CLOUD COMPUTING: A HYBRID APPROACH TO AUTOMATION OF OPERATIONS AND ENERGY SAVING.....	91
Voloshyn V.S., Opanasiuk M.Yu. INNOVATIVE APPROACHES TO THE DEVELOPMENT OF THE SERVER PART OF THE HOUSEHOLD BUDGET CONTROL WEB APPLICATION USING EXPRESS.....	97
Herashchenko O.O., Novikov P.V. AUTOMATION OF CLEAN ROOM VENTILATION SYSTEM USING MACHINE LEARNING METHODS.....	102
Golovko I.G., Savenko O.S., Medzatyi D.M., Ivanchenko O.V. ADVANCED TECHNIQUES IN SOFTWARE CODE OBFUSCATION USING ARTIFICIAL INTELLIGENCE.....	115
Denysiuk D.O., Savenko B.O., Kashtalian A.S., Ivanchenko O.V. METHOD FOR DETECTING MALICIOUS SOFTWARE BASED ON SYSTEM BEHAVIORAL PATTERN ANALYSIS.....	124
Dereza A. Yu. PRACTICAL TRAINING AND INTERNSHIPS FOR STUDENTS IN IT COMPANIES: MODELS OF INTERACTION BETWEEN UNIVERSITIES AND INDUSTRY.....	130
Zavgorodnii V.V., Zavgorodnya A.A., Vasiliev S.V., Prusov V.O. DEVELOPMENT OF A METHODOLOGY FOR USER ANONYMITY AND ANTI-TRACKING ONLINE.....	137
Zozulia V.A., Osadchii S.I. ALGORITHMS FOR REDUCING A SINGLE-LOOP MULTIDIMENSIONAL TRACKING CONTROL SYSTEM TO EQUIVALENT STABILIZATION SYSTEMS.....	143
Ivanyshyn V.V., Moshensky A.O. THE CONCEPT OF AN AUTOMATED APIARY MONITORING SYSTEM BASED ON LORA TECHNOLOGY USING REAL-TIME SENSORS.....	149
Karpenko M.I., Chumachenko S.M., Moshenskyi A.O., Guida O.H. ARGUMENTATION OF THE EFFICIENCY OF ALTERNATIVE MONITORING MEANS USING MESHTASTIC AND APRS.....	154
Korolenko Ya.R., Pavlovska Yu.O. SIMULATION OF THE MOVEMENT OF A WALKING ROBOT WITH A DAMAGED LIMB IN MATLAB.....	161
Lysenko O.I., Tachynyna O.M., Ponomarenko S.O., Furtat O.V., Hetman O.V., Podobnyed V.V. METHODOLOGY FOR THE SYNTHESIS OF A REGULAR CONDITION MONITOR FOR DIGITAL REGULATORS OF THE ELECTRIC DRIVES OF THE MAIN ROTORS OF SMALL CIVIL AVIATION.....	170
Lysyuk H.P. SYNTHESIS OF THE HEAT LOAD CONTROL SYSTEM OF THE DRUM BOILER IN THE COMBUSTION OF SOLID DOMESTIC WASTE.....	178
Marynych I.A., Makohonov A.V. DETECTION OF UAVS USING MACHINE VISION TECHNOLOGIES.....	188
Melnychenko D.V., Vakaliuk T.A., Farrakhov O.V., Kot N.S. ANALYSIS OF THE TOOLS FOR IMPLEMENTING A WEB APPLICATION FOR WORKING TIME MANAGEMENT.....	197
Movchan K.O. MODERN DRONE NAVIGATION STRATEGIES IN GPS-DENIED ENVIRONMENTS.....	203
Nazarova S.O., Nazarov D.L. TECHNOLOGY FOR DEVELOPING SOFTWARE TOOLS FOR MANAGING REMOTE WORK ACTIVITIES EXECUTORS OF IT PROJECTS.....	211
Nechyporenko V.A. UAV CONTROL METHODS USING COMPUTER VISION.....	217

Novak D.S., Oleshchenko L.M., Vasylenko V.M., Guida O.H., Ometsynska N.V. DEVELOPMENT OF SOFTWARE FOR CREDIT CARD CHARACTER RECOGNITION IN PYTHON.....	226
Palonyi A.S., Nechypurenko A.G. MODELLING THE DYNAMICS OF OCCUPATIONAL STRESS IN AIR TRAFFIC CONTROL.....	231
Panaskin D.V. APPLICATION OF CVAE AUGMENTATION METHODS TO IMPROVE LEARNING OF NEURAL NETWORKS IN LUNG SOUND ANALYSIS.....	240
Patsora A.A. ANALYSIS OF PROSPECTIVE WAYS OF INVOLVING BLOCKCHAIN AND WEB 3.0 IN EDUCATIONAL PROCESSES.....	246
Povkhan I.F., Saroz V.Ia., Leheza A.V. A MODIFIED METHOD OF THE SECOND-TYPE ALGORITHM TREE IN CLASSIFICATION TASKS.....	254
Prokofiev I.G., Savenko O.S., Medzaty D.M. METHOD OF STATISTICAL ANALYSIS OF SOFTWARE CODE USING COMPLEX PARAMETERS.....	262
Samofalov A.V., Tereikovskiy I.A. CONCEPTUAL MODEL OF THE FORMATION OF WEB-ORIENTED DATABASES OF EMOTIONALLY COLORED VOICE SIGNALS.....	270
Selotkin V.O., Voloshchuk V.A. AUTOMATED OPTICAL INSPECTION SYSTEM OF PRINTED CIRCUIT BOARDS. TECHNOLOGY OVERVIEW.....	275
Skulysh M.A., Dmytrenko O.A. A METHOD OF ORGANISATION OF MICROSERVICES ON KUBERNETES SERVER GROUPS.....	291
Slabinoha M.O., Boichuk T.V. AUTOMATED SYSTEM OF COMPUTER HARDWARE ASSETS MANAGEMENT AS A PART OF COMPLEX UNIVERSITY INFORMATION SYSTEM.....	298
Stopkin A.V. ALGORITHM FOR EXPLORATION OF A SIMPLE UNDIRECTED GRAPH BY A COLLECTIVE OF AGENTS.....	303
Tarasenko M.M., Nykolaychuk M.Ya. DEVELOPMENT AND TESTING OF REMOTE NOTIFICATION ALGORITHMS OF OPERATORS OF GAS DISTRIBUTION STATIONS WITH EMERGENCY ALARM FUNCTIONS BASED ON GSM-COMMUNICATION.....	310
Turchyn O.B. PREDICTING THE EFFICIENCY OF PUMPJACKS BASED ON RFID DATA AND MACHINE LEARNING METHODS.....	321
Fokin A.I. METHODS AND MODELS OF IDENTIFICATION OF RENEWABLE ENERGY MODELS.....	328
Cherniak I.O. RESEARCH OF DISTILBERT MODEL OPPORTUNITIES FOR FURTHER USE IN THE SYSTEM OF AUTOMATION OF ELECTRONIC DOCUMENTATION.....	337
Shevtsov I.O. HYBRID COMPUTING MODELS (FOG AND EDGE) FOR OPTIMIZING REMOTE MONITORING OF CHRONIC DISEASES.....	343
 CHEMICAL TECHNOLOGY	
Ivanchenko A.V., Voronov V.V. ADSORPTIVE REMOVAL OF PHOSPHATES AND SURFACTANTS FROM LIQUID WASTE BY CHEMICALLY MODIFIED ZEOLITE.....	354
INFORMATION ABOUT AUTHORS.....	360

ОБРОБКА МАТЕРІАЛІВ У МАШИНОБУДУВАННІ

УДК 539.422.52

DOI <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2024.5.1/01>**Бернацький А.В.**

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

Юрченко Ю.В.

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

Сіора О.В.

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

Соколовський М.В.

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

Сіора І.В.

Інститут хімії поверхні імені О.О. Чуйка Національної академії наук України

ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ ЛАЗЕРНОГО ВИПРОМІНЮВАННЯ НА СКЛОВІСНІ КОМПОЗИТНІ МАТЕРІАЛИ

Стаття присвячена вивченню поведінки склотекстоліту під дією лазерного випромінювання високої потужності, для визначення оптимальних параметрів руйнування цього композитного матеріалу. Використання лазерної зброї проти безпілотних літальних апаратів, виготовлених з композитів на основі скловолокна, є актуальним завданням, тому дослідження впливу параметрів лазерного променя, таких як потужність, діаметр плями і кут падіння, на ефективність руйнування матеріалу має важливе практичне значення. Для проведення експериментів використано Nd:YAG-лазер із потужністю випромінювання до 4,4 кВт і довжиною хвилі 1,06 мкм. Листи склотекстоліту розмірами 1000×500×2 мм піддавалися лазерній обробці з варіацією таких параметрів, як потужність (1–4 кВт), діаметр пучка (5–20 мм), кути падіння випромінювання (30°, 45°, 60°, 90°), а також швидкості переміщення лазерного пучка (0,5–2 м/хв). З'ясовано, що найбільш ефективно руйнування матеріалу спостерігалось при нормальному падінні пучка (90°) і потужності 1 кВт з мінімальною експозицією 0,5 с. Зі зменшенням кута падіння променя до 30°, час експозиції для гарантованого руйнування зростає до 1 с, що пояснюється збільшенням площі пучка і зниженням щільності потужності. Збільшення діаметра пучка до 10 мм вимагало довшого часу експозиції для досягнення руйнування, зокрема до 3 с при куті 30°. Діаметр 15 мм потребував збільшення потужності до 2–4 кВт для ефективного руйнування. Досліджено, що при потужності 4 кВт та швидкості переміщення променя до 1,5 м/хв руйнування не спостерігалось, що вимагає ретельної оптимізації параметрів для різних умов. Доведено, що для гарантованого руйнування матеріалу при товщині склотекстоліту 2 мм необхідно забезпечити енергетичну експозицію не менше 2500–3500 Дж/см². При енергетичних експозиціях менших за 2500 Дж/см² гарантованого руйнування зразка не відбувалося. Крім того, встановлено, що енергетична експозиція слабо залежить від зміни діаметра пучка. Наприклад, для потужностей 1–2 кВт ці показники залишаються на рівні 2500 Дж/см², але з підвищенням потужності до 4 кВт знижуються до 2250 Дж/см². Визначено, що при потужностях від 1 кВт і вище для пробиття склотекстоліту товщиною 2 мм необхідно досягти густини потужності 2000 Вт/см². При зниженні потужності до 0,5 кВт вимоги до густини різко зростають, що вимагає використання або більш точних оптичних систем для фокусування пучка, або збільшення потужності лазера, що ускладнює технологію та підвищує її вартість. Загалом, за результатами дослідження встановлено оптимальні параметри лазерної обробки склотекстоліту, які можуть бути використані для розробки стратегій боротьби з БПЛА, виготовленими з композитних матеріалів.

Ключові слова: БПЛА, композитні матеріали, склотекстоліт, лазерне випромінювання, термічний вплив, випаровування, руйнування.

Постановка проблеми. З розвитком сучасних технологій авіаційна галузь усе більше орієнтується на використання композитних матеріалів, серед яких скловмісні матеріали, зокрема склотекстоліт, посідають провідне місце. Завдяки своїм високим механічним характеристикам і стійкості до високих температур, склотекстоліт став незамінним матеріалом для виготовлення дронів, які активно використовуються як в цивільній, так і у військовій авіації [1]. Проте поява нових загроз, таких як лазерна зброя, ставить питання щодо надійності цих матеріалів у бойових умовах [2]. Лазерне випромінювання може стати серйозним фактором руйнування структури композитних матеріалів, тому необхідність дослідження поведінки склотекстоліту під дією високопотужних лазерів є актуальним. Такі дослідження дозволять не тільки глибше зрозуміти механізми руйнування, а й розробити ефективну стратегію боротьби з БПЛА за допомогою лазерного випромінювання.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. На початку розвитку виробництва склопластику, він був найпоширенішим армуючим матеріалом. Це був революційний період, коли він успішно замінив метал у високотехнологічних галузях машинобудування [1, 3]. Навіть незважаючи на значний розвиток графену або вуглецевих волокон, на виробництво скловолокна все ще припадає понад чотири п'ятих ринку полімерних композитних матеріалів. Підрахунки стверджують, що 85% скла, яке виробляється у світі щороку, використовується для армування пластмас [1]. Одним з поширених представників цього класу композитних матеріалів є склопластик FR-4 (склотекстоліт), якості якого повністю виправдовують і сприяють його переважанню на ринку композитів: він має дуже хорошу міцність на розрив (близько 4,6 ГПа), а також стійкість до стиснення і ударних навантажень, стабільність розмірів і корозійну стійкість; пластичний і відносно легко переробляється у волокна; має дуже конкурентоспроможну питому міцність (оскільки має низьку щільність – близько $2,5 \times 10^{-3}$ кг/м³); низька ціна в порівнянні з іншими композитами; для багатьох застосувань також важливо, що він негігроскопічний (не поглинає вологу з навколишнього середовища) та не розкладається і не горить [4–5].

Були проведені кілька досліджень, що стосуються впливу лазерного випромінювання на скловмісні композитні матеріали. Виявлено, що лазерне випромінювання призводить до швидкого локального нагрівання матеріалу, це спричиняє його

руйнування, зокрема спостерігаються процеси випаровування та розшарування. Товщина шару, що піддається випаровуванню, досягає 1–2 мм, залежно від часу експозиції і потужності лазера. При тривалому часі експозиції лазерного випромінювання матеріал повністю руйнується [6].

Оптичний зв'язок світла зі склопластиком у видимій і ближній інфрачервоній області залежить від товщини матеріалу, але також сильно змінюється залежно від довжини хвилі, через наявність специфічних для полімеру смуг поглинання в цьому спектральному діапазоні. При більшій довжині хвилі світло не проходить навіть через найтонший зразок, оскільки спочатку полімер, а потім і скловолокно стають непрозорими в середньому і далекому інфрачервоному спектрі. При довжині хвилі 1070 нм оптичний відгук зразків склопластику також залежить від температури аж до температури руйнування полімерної матриці, при якій відбувається утворення залишків вуглецю, що робить матеріал високопоглинаючим [7].

Використання лазера з безперервною дією є оптимальним варіантом для руйнування композитів зі склопластику. Однак ефективність випаровування лазера з безперервною дією була невисокою, через недостатній піроліз і горіння композитів на основі смол. Ці скловолокна і відповідні реакції із залишковим вуглецем утворювали SiC, який перешкодив подальшому горінню [8].

Постановка завдання. Мета роботи – вивчення поведінки склотекстоліту під дією лазерного випромінювання високої потужності, для визначення оптимальних параметрів руйнування цього композитного матеріалу.

Виклад основного матеріалу. Для проведення досліджень використовувався Nd:YAG-лазер «DY044» з потужністю випромінювання до 4,4 кВт та довжиною хвилі випромінювання $\lambda=1,06$ мкм, виробництва фірми «Rofin-Sinar» (виробництва Німеччини). В якості матеріалу цілі був використаний лист склотекстоліту 1000×500×2 мм. Параметри обробки наступні: час дії лазерного випромінювання 0,25 с, 0,5 с, 1 с, 2 с, 3 с; потужність лазерного випромінювання 1 кВт, 2 кВт, 3 кВт, 4 кВт; швидкість переміщення лазерного променя 0,5 м/хв, 0,75 м/хв, 1 м/хв, 1,5 м/хв, 2 м/хв; діаметр плями лазерного випромінювання 5 мм, 10 мм, 15 мм, 20 мм; кути падіння лазерного променя відносно поверхні матеріалу 30°, 45°, 60°, 90°. В зону обробки направлявся потік повітря під тиском, для видалення продуктів руйнування.

За результатами проведених експериментів було виявлено, що для гарантованого руйнування матеріалу під кутом 90° з потужністю лазерного випромінювання 1 кВт та діаметра пучка 5 мм, необхідний час експозиції становить 0,5 с (рис. 1, а).

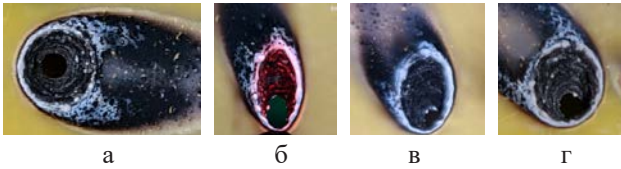


Рис. 1. Отвори утворені в результаті дії лазерного випромінювання потужністю 1 кВт та діаметром плями 5 мм: а – кут 90° , $t = 0,5$ с; б – кут 30° , $t = 1$ с; в – кут 45° , $t = 0,5$ с; г – кут 60° , $t = 0,5$ с

Але вже при кутах падіння лазерного випромінювання 30° , 45° , 60° відносно матеріалу, час експозиції зростає через збільшення площі лазерного пучка, та як результат, меншої густини потужності та більшого розсіювання тепла. Дана закономірність виконується також для інших потужностей та кутів падіння лазерного випромінювання. Так для гарантованого руйнування матеріалу при потужності лазерного випромінювання 1 кВт та діаметром пучка 5 мм під кутами 30° , 45° , 60° , час експозиції становить 1 с, 0,5 с, 0,5 с відповідно (рис. 1, б, в, г). При збільшенні діаметру плями до 10 мм, для гарантованого руйнування матеріалу з потужністю лазерного випромінювання 1 кВт, мінімально необхідний час експозиції для кута 30° становив 3с (рис. 2, а), а для кутів 45° , 60° , 90° – 2 с (рис. 2 б, в, г).

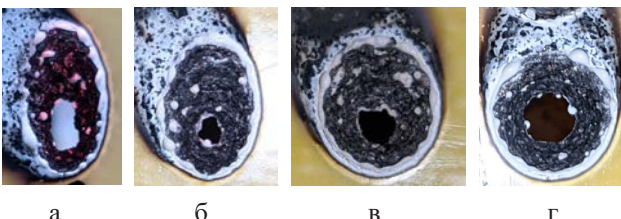


Рис. 2. Отвори утворені в результаті дії лазерного випромінювання потужністю 1 кВт та діаметром плями 10 мм: а – кут 30° , $t = 3$ с; б – кут 45° , $t = 2$ с; в – кут 60° , $t = 2$ с; г – кут 90° , $t = 2$ с

При збільшенні діаметра плями до 15 мм, потужності 1 кВт під кутами 30° – 90° і експозиції 3 с вже не вистачало для гарантованого руйнування матеріалу. Було вирішено збільшити потужність до 2 кВт. Для гарантованого руйнування на даній потужності, мінімально необхідна експозиція для руйнування матеріалу становила 3 с для всіх кутів (рис. 3).

При збільшенні діаметра плями до 20 мм, при потужності лазерного випромінювання 2 кВт не вистачило для гарантованого руйнування матеріалу.

Тому потужність збільшили до 3 кВт. За даної потужності вдалося досягти руйнування лише при куті падіння лазерного випромінювання 90° і експозиції 3 с (рис. 4, а).

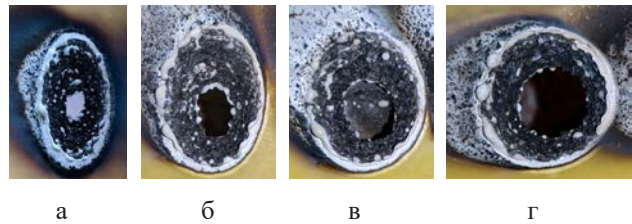


Рис. 3. Отвори утворені в результаті дії лазерного випромінювання потужністю 2 кВт, з діаметром плями 15 мм та експозицією 3 с: а – кут 30° ; б – кут 45° ; в – кут 60° ; г – кут 90°

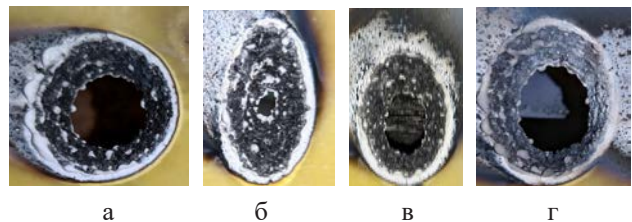


Рис. 4. Отвори утворені в результаті дії лазерного випромінювання потужністю 3–4 кВт, з діаметром плями 20 мм та експозицією 3с: а – кут 30° ; б – кут 45° ; в – кут 60° ; г – кут 90°

Для руйнування матеріалу під іншими кутами потужність підняли до 4 кВт та експозиція становила 3 с (рис. 4, б, в, г).

Також проводились дослідження руйнування під час переміщення лазерного випромінювання відносно поверхні матеріалу. Діаметри пучка лазерного випромінювання становили 5 мм та 10 мм за потужності 2–4 кВт. Так для гарантованого руйнування матеріалу при падінні лазерного випромінювання під кутом 30° , діаметрі пучка 5 мм та потужності 2 кВт, мінімальна швидкість переміщення становила 0,5 м/хв (рис. 5, а). При збільшенні потужності до 3–4 кВт та швидкості переміщення до 0,75–1 м/хв також відбувалося руйнування матеріалу. Але при потужності 4 кВт та швидкості переміщення 1,5 м/хв гарантоване руйнування не спостерігалось (рис. 5, б).

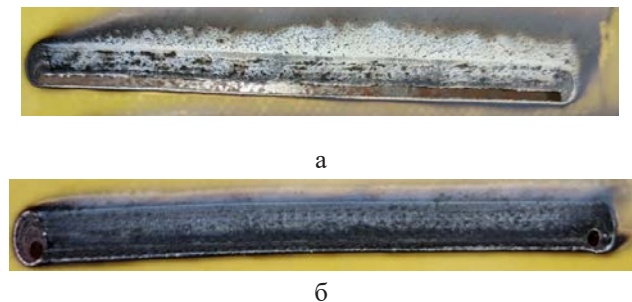


Рис. 5. Результат опромінення лазерним випромінюванням під кутом 30° , з діаметром плями 5 мм: а – $P = 2$ кВт, $V = 0,5$ м/хв; б – $P = 4$ кВт, $V = 1,5$ м/хв

При збільшенні діаметра пучка до 10 мм, потужності 4 кВт і швидкістю переміщення 0,5 м/хв гарантованого руйнування не спостерігалося (рис. 6).

При збільшенні кута падіння лазерного випромінювання до 45°, для гарантованого руйнування матеріалу, мінімальні параметри обробки становлять: потужність лазерного випромінювання 2 кВт, швидкість переміщення 0,75 м/хв, діаметр пучка 5 мм (рис. 7, а). Але при збільшенні швидкості до 1 м/хв руйнування не спостерігається (рис. 7, б).

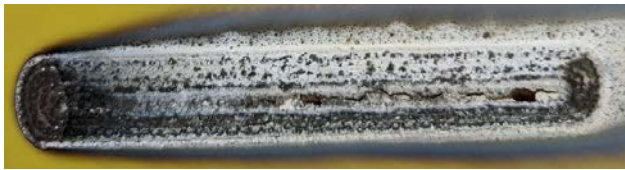


Рис. 6. Результат опромінення лазерним випромінюванням під кутом 30°, з діаметром плями 10 мм, потужністю 4 кВт і швидкістю переміщення 0,5 м/хв



а



б

Рис. 7. Результат опромінення лазерним випромінюванням під кутом 45°, з діаметром плями 5 мм, потужністю 2 кВт: а – $V = 0,75$ м/хв; б – $V = 1$ м/хв

При збільшенні потужності лазерного випромінювання до 3–4 кВт, відбувалося гарантоване руйнування включно до швидкості 1 м/хв (рис. 8, а), але вже на швидкості 1,5 м/хв руйнування не спостерігалося при потужності 3–4 кВт (рис. 8, б)



а



б

Рис. 8. Результат опромінення лазерним випромінюванням під кутом 45°, з діаметром плями 5 мм: а – $P = 3$ кВт, $V = 1$ м/хв; б – $P = 4$ кВт, $V = 1,5$ м/хв

При збільшенні діаметра лазерного променя до 10 мм, гарантоване руйнування матеріалу від-

бувалося тільки при потужності 4 кВт та швидкості переміщення 0,5 м/хв (рис. 9).

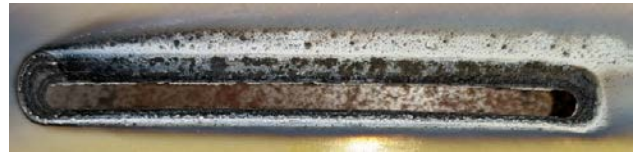


Рис. 9. Результат опромінення лазерним випромінюванням під кутом 45°, з діаметром плями 10 мм, $P = 3$ кВт, $V = 0,5$ м/хв

При збільшенні кута падіння лазерного випромінювання до 60°, для гарантованого руйнування матеріалу, мінімальні параметри обробки становлять: потужність лазерного випромінювання 2 кВт, швидкість переміщення 0,75 м/хв, діаметр пучка 5 мм (рис. 10, а). Також руйнування спостерігається при потужностях 3–4 кВт на швидкостях переміщення до 1–1,5 м/хв (рис. 10, б, в, г).



а



б



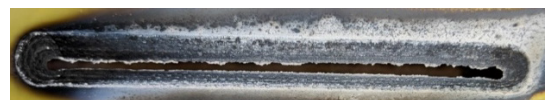
в

Рис. 10. Результат опромінення лазерним випромінюванням під кутом 60°, з діаметром плями 5 мм: а – $P = 2$ кВт, $V = 0,75$ м/хв; б – $P = 3$ кВт, $V = 1$ м/хв; в – $P = 4$ кВт, $V = 1,5$ м/хв

При збільшенні діаметра лазерного променя до 10 мм, гарантоване руйнування матеріалу відбувалося при потужності 3–4 кВт та швидкості переміщення 0,5–0,75 м/хв (рис. 11).



а



б

Рис. 11. Результат опромінення лазерним випромінюванням під кутом 60°, з діаметром плями 10 мм: а – $P = 3$ кВт, $V = 0,5$ м/хв; б – $P = 4$ кВт, $V = 0,75$ м/хв

При збільшенні кута падіння лазерного випромінювання до 90° , для гарантованого руйнування матеріалу, мінімальні параметри обробки становлять: потужність лазерного випромінювання 2 кВт, швидкість переміщення 0,75 м/хв, діаметр пучка 5 мм (рис. 12, а). При збільшенні потужності до 3–4 кВт та швидкості до 1–1,5 м/хв теж спостерігається руйнування (рис. 12, б, в).

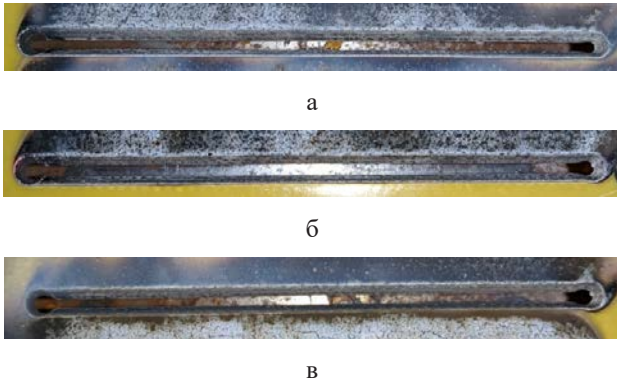


Рис. 12. Результат опромінення лазерним випромінюванням під кутом 90° , з діаметром плями 5 мм: а – $P = 2$ кВт, $V = 0,75$ м/хв; б – $P = 3$ кВт, $V = 1$ м/хв; в – $P = 4$ кВт, $V = 1,5$ м/хв

При збільшенні діаметра лазерного променя до 10 мм, гарантоване руйнування матеріалу відбувалося при потужності 3–4 кВт та швидкості переміщення 0,5–0,75 м/хв (рис. 13).

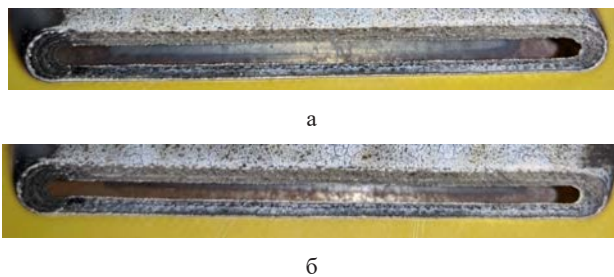


Рис. 13. Результат опромінення лазерним випромінюванням під кутом 90° , з діаметром плями 10 мм: а – $P = 3$ кВт, $V = 0,5$ м/хв; б – $P = 4$ кВт, $V = 0,75$ м/хв

За результатами досліджень були побудовані графіки для обробки отворів під кутом 90° на основі отриманих числових значень (рис. 14–17). Рисунок 14 відображає результати деструкції зразків склотекстоліту товщиною 2,0 мм, в залежності від співвідношення значень енергетичної експозиції (яка являє собою відношення енергії випромінювання до площі поверхні, яка опромінюється) та діаметру пучка на поверхні зразка, що обробляється. У верхній частині графіка 14 знаходиться область позначена зеленим кольором, у якій для

всіх значень вказаних параметрів, відбувається гарантоване руйнування зразку зі склотекстоліту товщиною 2,0 мм. У нижній частині рисунку 14 знаходиться область позначена червоним кольором, у якій для зазначених параметрів руйнування зразка зі склотекстоліту не було досягнуто взагалі. Посередині рисунку 14, між зеленою та червоною областями знаходиться частина позначена жовтим кольором. У жовтій області зафіксоване часткове (початкове) руйнування зразків зі склотекстоліту (без досягнення повного його пробиття).

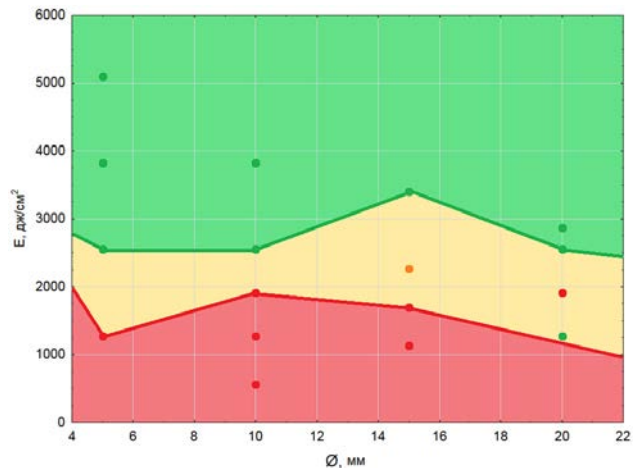


Рис. 14. Залежність результатів обробки від значень енергетичної експозиції та діаметру пучка лазерного випромінювання

Аналізуючи характер залежностей на рисунку 14, можна стверджувати, що гарантоване руйнування (пробиття) зразків з склотекстоліту товщиною 2,0 мм, вимагає одержання значень енергетичної експозиції не менше ніж 2500...3500 Дж/см² та слабо залежить від зміни діаметру лазерного пучка. При значеннях енергетичної експозиції менше 2500 Дж/см² руйнування зразка зі склотекстоліту товщиною 2,0 мм не може бути гарантованим.

На рис. 15 показаний графік залежності результатів обробки від значень енергетичної експозиції та потужності пучка лазерного випромінювання. Характер залежностей на рис.15 подібний до залежностей наведених на рис. 14. Так само, гарантоване руйнування (пробиття) зразків з склотекстоліту товщиною 2,0 мм, вимагає одержання певних значень енергетичної експозиції не менше ніж 2500...3500 Дж/см² та слабо залежить від зміни потужності пучка лазерного випромінювання. Як видно з графіку для потужностей 1–2 кВт ці значення знаходяться на одному рівні близько 2500 Дж/см², та знижується зі зростанням потужності лазерного випромінювання, що

використовується. Так для потужності 4 кВт вона зменшується до 2250 Дж/см².

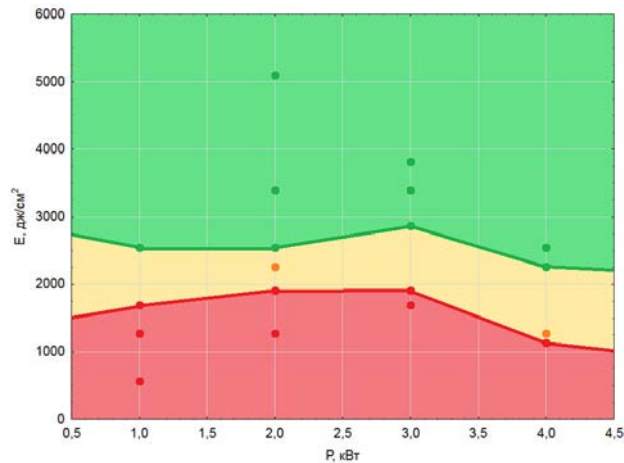


Рис. 15. Залежність результатів обробки від значень енергетичної експозиції та потужності лазерного випромінювання

На рис. 16 показаний графік залежності результатів обробки від значення енергетичної експозиції та часу обробки. Так само, як й для попереднього рисунку, характер залежностей на рис. 16 подібний до залежностей наведених на рис. 14 та рис. 15. Так само, гарантоване руйнування (пробиття) зразків з склотекстоліту товщиною 2,0 мм, вимагає одержання певних значень енергетичної експозиції не менше ніж 2250–2950 Дж/см² для всіх проміжків часу 0,25–3 секунди впливу на зразок, що обробляється.

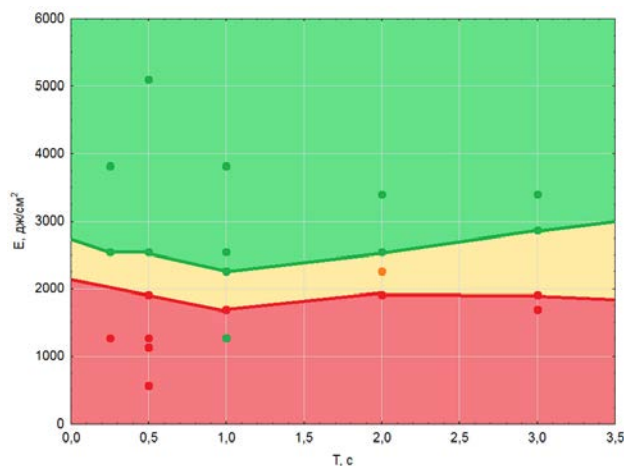


Рис. 16. Залежність результатів обробки від значень енергетичної експозиції та часу обробки

На рис. 17 показано характер залежностей результатів експерименту від густини потужності та часу обробки.

З рис. 17 видно, що практично відсутня «зона невизначеності» (яка позначена жовтим кольо-

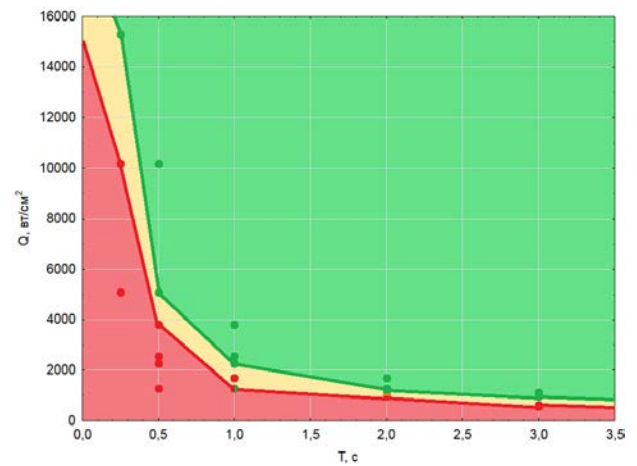


Рис. 17. Залежність результатів обробки від значень енергетичної експозиції та від густини потужності та часу обробки

ром), де пробиття не гарантоване. Це вказує, що матеріал гарно поглинає лазерне випромінювання зі зростанням часу впливу. Залежності мають гіперболічний характер. Для того щоб одержати гарантоване руйнування (пробиття) зразків з склотекстоліту товщиною 2,0 мм при використанні лазера з потужністю від 1,0 кВт та вище, достатньо досягнути густини потужності 2000 Вт/см². Відповідно зі зменшенням потужності лазерного випромінювання від 1,0 кВт до 0,5 кВт та нижче спостерігається різке збільшення вимог до значень густини потужності, при яких досягається повне пробиття матеріалу. Це може бути досягнуто або шляхом зменшення площі пучка на зразку, або збільшення потужності лазерного випромінювання. Перше вимагає використання складних оптико-механічних та оптико-електронних систем, а друге значно здорожчає реалізацію даного проекту.

Висновки. За результатами проведених експериментів було встановлено, що кут падіння лазерного випромінювання, діаметр пучка і потужність лазера мають значний вплив на час і ефективність руйнування композиційних скловмісних матеріалів. Для гарантованої деструкції склотекстоліту товщиною 2,0 мм при куті падіння лазерного випромінювання 90° і потужності 1 кВт, необхідний час експозиції становив лише 0,5 с, тоді як при менших кутах (30°, 45°, 60°) час експозиції збільшувався через зменшення щільності потужності пучка і розсіювання тепла. Наприклад, для кута 30° час експозиції зріс до 1 с. Збільшення діаметра пучка лазера до 10 мм при тих же параметрах призвело до необхідності збільшення часу експозиції до 3 с для кута 30°, і до 2 с для кутів

45°, 60°, і 90°. При збільшенні діаметра пучка до 15 мм і збереженні потужності на рівні 1 кВт, навіть тривала експозиція не призводила до гарантованого руйнування, що вимагало підвищення потужності до 2 кВт для досягнення потрібного результату. Дослідження також показало, що при потужності 3–4 кВт і швидкостях переміщення лазерного випромінювання до 1–1,5 м/хв забезпечується руйнування матеріалу. Однак при швидкості 1,5 м/хв і потужності 4 кВт руйнування не відбувалося. Таким чином, для різних кутів і діаметрів пучка необхідно коригувати потужність і швидкість лазера, щоб досягти гарантованого руйнування матеріалу.

Гарантоване руйнування зразків з склотекстоліту товщиною 2,0 мм, вимагає одержання значень енергетичної експозиції не менше ніж 2500...3500 Дж/см² та слабо залежить від зміни діаметру лазерного пучка. При значеннях енергетичної експозиції менше 2500 Дж/см² руйнування зразка зі склотекстоліту товщиною 2,0 мм не може бути гарантованим.

Гарантоване руйнування зразків з склотекстоліту товщиною 2,0 мм, вимагає одержання певних значень енергетичної експозиції не менше ніж 2500...3500 Дж/см² та слабо залежить від зміни потужності пучка лазерного випромінювання. Як видно з графіку для потужностей 1–2 кВт ці

значення знаходяться на одному рівні близько 2500 Дж/см², та знижується зі зростанням потужності лазерного випромінювання, що використовується. Так для потужності 4 кВт вона зменшується до 2250 Дж/см².

Для того щоб одержати гарантоване руйнування (пробиття) зразків з склотекстоліту товщиною 2,0 мм при використанні лазера з потужністю від 1,0 кВт та вище, достатньо досягнути густини потужності 2000 Вт/см². Відповідно зі зменшенням потужності лазерного випромінювання від 1,0 кВт до 0,5 кВт та нижче спостерігається різке збільшення вимог до значень густини потужності, при яких досягається повне пробиття матеріалу. Це може бути досягнуто або шляхом зменшення площі пучка на зразку, або збільшення потужності лазерного випромінювання. Перше вимагає використання складних оптико-механічних та оптико-електронних систем, а друге значно здорожчає реалізацію даного проекту.

Фінансування. Дослідження виконано за рахунок фінансування Національним фондом досліджень України проекту № 2023.04/0166 «Дослідження впливу лазерного пучка на матеріали деталей БПЛА та обґрунтування технічних параметрів лазерного обладнання мобільного комплексу для боротьби з ними» за договором грантової підтримки № 155/0166 від 01.08.2024.

Список літератури:

1. Wang X., Wu G., Xie P., Gao X., Yang W. Microstructure and properties of glass fiber-reinforced polyamide/nylon microcellular foamed composites. *Polymers*. 2020. № 12. 2368. <https://doi.org/10.3390/polym12102368>
2. Steinvall O. The potential role of laser in combating UAVs: part 2; laser as a countermeasure and weapon. *Technologies for Optical Countermeasures XVIII and High-Power Lasers: Technology and Systems, Platforms, Effects V*. 2021. №11867, 1186707. <https://doi.org/10.1117/12.2601755>
3. Săftoiu G.-V., Constantin C., Nicoară A.-I., Pelin G., Ficăi D., Ficăi A. Glass fibre-reinforced composite materials used in the aeronautical transport sector: A critical circular economy point of view. *Sustainability*. 2024. № 16(11). 4632. <https://doi.org/10.3390/su16114632>
4. Prabhu M., Murugan K., Kumar Solaiappan S., Solaiappan S. K., Raji A. P., Gnanasekaran R. K., et al. Design and multi-perspective based computational analyses of flying wing UAV for rescue applications at cryogenic environments. *AIAA AVIATION 2022 Forum*. Chicago, IL. 2022. <https://doi.org/10.2514/6.2022-3586>
5. Beziuk G., Baum T. C., Ghorbani K., Nicholson K. J. Structurally integrated radar in an aerospace composite laminate. *IEEE Transactions on Components, Packaging and Manufacturing Technology*. 2021. № 11(11). P. 1835-1843. <https://doi.org/10.1109/TCPMT.2021.3118108>
6. Kujawinska M., Kustron K., Siedlecki K., Malesa M. Investigations of high power laser beam interaction with composite materials by means of digital image correlation and thermography. *High-Power Lasers: Technology and Systems, Platforms, and Effects*. 2017. №10436. 104360H. <https://doi.org/10.1117/12.2281119>
7. Allheily V., Retailleau F., Jean T., Merlat L. Modelling the behaviour of UAVs structural materials under continuous laser irradiations. *High-Power Lasers and Technologies for Optical Countermeasures*. 2022. № 12273. 1227306. <https://doi.org/10.1117/12.2637845>
8. Jing Xi., Gang R., Rongjun G., Chunquan G., Yongjun X., Quanxi L., et al. Research on the ablation characteristics of combined lasers for glass fiber reinforced plastic composites. *Frontiers in Physics*. 2023. № 11. <https://doi.org/10.3389/fphy.2023.1230004>

Bernatskyi A.V., Yurchenko Yu.V., Siora O.V., Sokolovskyi M.V., Siora I.V. STUDY OF THE EFFECT OF LASER RADIATION ON GLASS-CONTAINING COMPOSITE MATERIALS

The article is devoted to the study of the behavior of fiberglass under the action of high-power laser radiation to determine the optimal parameters of destruction of this composite material. The use of laser weapons against unmanned aerial vehicles made of fiberglass-based composites is an urgent task, so the study of the effect of laser beam parameters, such as power, spot diameter, and angle of incidence, on the material destruction efficiency is of great practical importance. For the experiments, we used a Nd:YAG laser with a radiation power of up to 4.4 kW and a wavelength of 1.06 μm. Fiberglass sheets with dimensions of 1000 × 500 × 2 mm were laser processed with the variation of such parameters as power (1–4 kW), beam diameter (5–20 mm), angles of incidence (30°, 45°, 60°, 90°), and laser beam travel speed (0.5–2 m/min). It was established the most effective material destruction was observed at a normal beam incidence (90°) and a power of 1 kW with a minimum exposure of 0.5 s. With a decrease in the beam incidence angle to 30°, the exposure time for guaranteed destruction increased to 1 s, which is explained by an increase in the beam area and a decrease in power density. Increasing the beam diameter to 10 mm required a longer exposure time to achieve destruction, in particular, up to 3 s at an angle of 30°. A diameter of 15 mm required an increase in power to 2–4 kW for effective destruction. It was determined that no fracture was observed at a power of 4 kW and a beam speed of up to 1.5 m/min, which requires careful optimization of the parameters for different conditions. It is proved that for guaranteed destruction of the material at a fiberglass thickness of 2 mm, it is necessary to provide an energy exposure of at least 2500–3500 J/cm². At energy exposures of less than 2500 J/cm², guaranteed destruction of the sample did not occur. In addition, it was confirmed that the energy exposure is weakly dependent on changes in the beam diameter. For example, for powers of 1–2 kW, these indicators remain at the level of 2500 J/cm², but with an increase in power to 4 kW they decrease to 2250 J/cm². It has been found that at powers of 1 kW and above, to pierce fiberglass with a thickness of 2 mm, it is necessary to achieve a power density of 2000 W/cm². When the power is reduced to 0.5 kW, the density requirements increase dramatically, requiring the use of either more precise optical systems for focusing the beam or an increase in laser power, which complicates the technology and increases its cost. In general, the results of the study have established the optimal parameters of laser processing of fiberglass, which can be used to develop strategies to combat UAVs made of composite materials.

Key words: UAVs, composite materials, fiberglass, laser radiation, thermal effects, evaporation, fracture.

АВІАЦІЙНА ТА РАКЕТНО-КОСМІЧНА ТЕХНІКА

УДК 37.013:656.7

DOI <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2024.5.1/02>**Стратонов В.М.**

Льотна академія Національного авіаційного університету

Юрченко Д.С.

Льотна академія Національного авіаційного університету

АНАЛІЗ БЕЗПЕКОВОГО СТАНУ ЦИВІЛЬНОЇ АВІАЦІЇ: РИЗИКИ ВЕРБУВАННЯ ТА ПІДКУПУ СПІВРОБІТНИКІВ СЛУЖБИ АВІАЦІЙНОЇ БЕЗПЕКИ

У статті розглядаються актуальні питання безпекового стану цивільної авіації в Україні та світі. Сучасні виклики та загрози вимагають постійного аналізу стану авіаційної безпеки з метою пошуку адекватних та ефективних заходів для її зміцнення. Проаналізовано інтенсивність конфліктів у світі за останні 10 років. Виявлено, що ризики для безпечного функціонування цивільної авіації знаходяться в площині не лише прямого впливу збройних конфліктів, але також можуть виникати в результаті актів незаконного втручання. Проведений аналіз актів незаконного втручання у світі показав, що за останні декілька десятиліть можливості злочинців та терористів для їх здійснення тільки збільшуються. Порівняно із 1993 роком, коли основна частка актів незаконного втручання була нападами на повітряні судна (62,5%), у 2022 році більшість – це атаки на аеропорти чи інші об'єкти цивільної авіації. Окрім цього, за підсумками 2022 року в світі було зареєстровано найбільшу кількість актів незаконного втручання за останні 30 років (61 випадок). Подібні факти та тенденції підтверджують тезу про те, що незважаючи на вживані заходи щодо зміцнення безпеки цивільної авіації, у злочинних угруповань залишається багато можливостей для здійснення нападів. При цьому періодично трапляються випадки, коли відбувається підкуп чи вербування співробітників служб авіаційної безпеки злочинними угрупованнями з метою здійснення терористичних актів чи інших протиправних дій. Окрім цього у роботі було проаналізовано існуючі методики, які застосовуються на етапах підбору та прийняття на посаду співробітників, робота яких пов'язана з безпекою: митників, суддів та ін. Встановлено, що ефективними засобами перевірки є – проходження перевірки за допомогою поліграфу, проходження спеціального тестування, що складається з кількох етапів тощо. Тому важливим завданням на сучасному етапі формування ефективної системи забезпечення авіаційної безпеки є виявлення неблагодійних осіб серед співробітників служби авіаційної безпеки.

Ключові слова: цивільна авіація, служба авіаційної безпеки, акти незаконного втручання, авіаційна безпека, підкуп, вербування, кадрова безпека.

Постановка проблеми. Актуальність комплексу питань, пов'язаних із забезпеченням безпекового стану в сучасній системі міжнародних відносин, обумовлена, передусім, безпрецедентною взаємозалежністю країн світу в ХХІ столітті. Україна як активний учасник міжнародних відносин зазнала суттєвого зовнішнього агресивного впливу з боку сусідньої держави, що негативним чином позначилося на її безпековому стані. При цьому це стосується як національної безпеки України, так і окремих її складових, однією з яких є безпековий стан цивільної авіації (ЦА).

Повномасштабне вторгнення армії РФ на територію України 24 лютого 2022 року критичним чином змінило життя всієї країни. Наслідком російської агресії стало повне закриття повітряного простору над територією України та масове блокування діяльності вітчизняної ЦА, але навіть після закінчення війни та відновлення діяльності ЦА, ризики для неї залишатимуться. Тому актуальним завданням на сьогодні є виявлення тих небезпек, які можуть мати місце в сфері ЦА, що у подальшому дозволить розробити заходи для усунення чи мінімізації негативного впливу.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Теоретичні аспекти безпекового стану, а також забезпечення національної безпеки в сфері функціонування ЦА активно досліджуються як вітчизняними, так і зарубіжними науковцями, серед яких варто виділити: Г.П. Ситника [1], Б.Б. Бабкіну [2], В.П. Горбатенко [2], Л.С. Єрмоленко-Князеву [8], Л.В. Мошняга [8], А.С. Філіппова [10] та інших. Однак, незважаючи на велику кількість наукових досліджень, присвячених забезпеченню авіаційної безпеки (АБ) в сфері ЦА, питання її зміцнення в умовах сучасних викликів та загроз потребують проведення подальших досліджень.

Постановка завдання. Метою статті є аналіз безпекового стану у світі та Україні у контексті діяльності цивільної авіації.

Виклад основного матеріалу. ЦА є невід’ємною складовою сучасного світу. Широкий спектр напрямів використання ЦА створює безліч ризиків її для безпекового стану, який може погіршуватися як внаслідок об’єктивних чинників, так і внаслідок впливу людського фактору. Сучасний світ є вкрай турбулентним та непередбачуваним. В таких умовах забезпечення безпеки ЦА перетворюється на завдання підвищеної складності. При цьому різного роду соціально-політичні кризи та воєнні конфлікти створюють значні перешкоди на шляху вирішення завдання з підтримання належного рівня АБ.

До основних причин загострення ризиків, що впливають на рівень безпекового стану та сприяють появі різного роду криз, конфліктів, війн

у світі у ХХІ столітті Г.П. Ситник відносить наступні п’ять чинників: 1) соціальна напруженість в державі, що має потенціал до переростання у соціально-політичну кризу; 2) численні факти порушення прав та свобод людини, що гарантовані їй на законодавчому рівні; 3) відхилення від встановлених правил та домовленостей міжнародних режимів, якими регулюються питання підтримки миру та забезпечення міжнародної безпеки; 4) підтримка керівництвом держави терористичних організацій; 5) дії щодо виготовлення та розповсюдження зброї для масового знищення людей та всього живого [1, с. 20]. З теоретичної точки зору всю сукупність конфліктів у суспільно-політичному житті О.В. Бабкіна та В.П. Горбатенко пропонують розділити на три великі групи: конфлікт цінностей; конфлікт інтересів та конфлікт ідентифікації [2, с. 325–328].

В окремих країнах світу, включаючи Україну (НАЦ «УССД» – Недержавний аналітичний центр «Українські студії політичних досліджень» [3]), існують спеціалізовані організації, які проводять ґрунтовні дослідження щодо суспільно-політичного та безпекового стану. Так, визнаною у всьому цивілізованому світі організацією, якою досліджуються міжнародні конфлікти, є Гейдельберзький інститут дослідження міжнародних конфліктів (НПК). З 1991 року НПК активно досліджує виникнення, динаміку та врегулювання політичних конфліктів. З того часу на щорічній основі Інститут публікує відповідні звіти [4]. На рис. 1 наведено порівняльний аналіз інтенсивності кон-

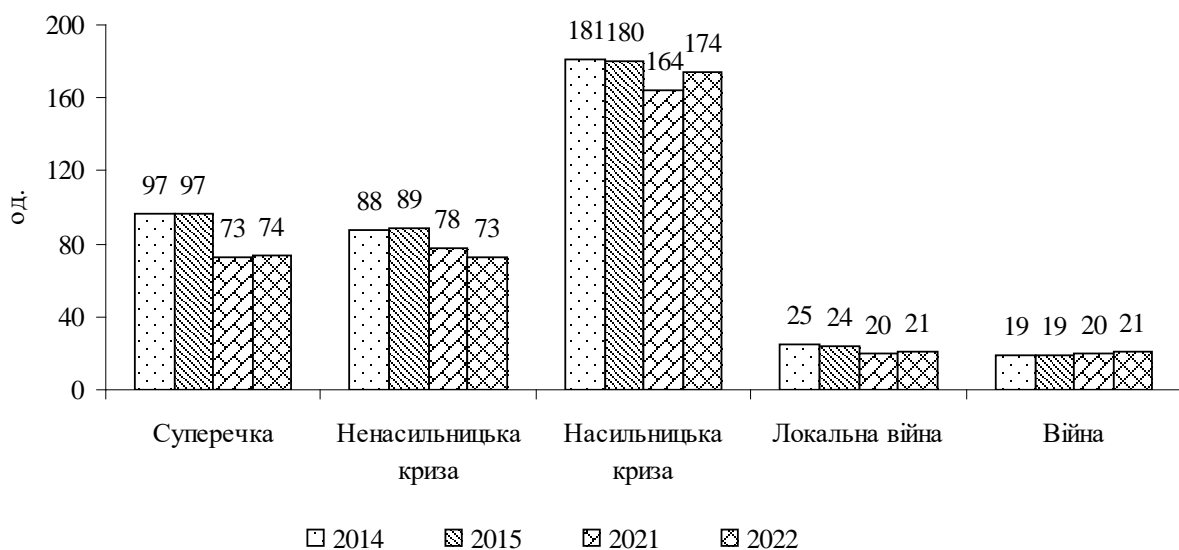


Рис. 1. Інтенсивність конфліктів у світі у 2014–2015 та у 2021–2022 рр. (за даними НПК)

Джерело: складено автором на основі [5]

фліктів у світі у 2014–2015 та у 2021–2022 роках, що загалом дає змогу оцінити глобальний рівень безпекового стану у світі за останнє десятиріччя.

Таким чином, світ залишається достатньо турбулентним, різного роду конфлікти постійно виникають та продовжують існувати, що не дає змоги говорити про поліпшення безпекового стану.

Найбільший удар система безпеки України зазнала 24 лютого 2022 року після нападу армії РФ. Експерти називають цю війну наймасштабнішою та найбільш трагічною війною на європейському континенті з часів після завершення Другої світової війни. Основні ризики для ЦА пов'язані із небезпекою бути знищеними внаслідок ударів РФ, як це було із МН17 у липні 2014 року [6, с. 4–16], а також небезпекою потрапляння в зону ураження від дії сил протиповітряної обороти України, основним завданням якої є відбиття ракетних атак, які на постійній основі здійснюються РФ з самого початку повномасштабного вторгнення.

Однак, ризики для безпечного функціонування ЦА знаходяться в площині не лише прямого впливу збройних конфліктів. Досить часто злочинні чи терористичні угруповання намагаються здійснювати удари по ЦА використовуючи інші, більш витончені методи. Значні ризики для безпеки ЦА становлять так звані акти незаконного втручання (АНВ) (від англ. – acts of unlawful interference). Відповідно до ст. 86 Повітряного кодексу України [7] АНВ вважається будь-яка дія чи спроба вчинення актів, які несуть загрозу безпеці ЦА. Перелік актів незаконного втручання є чітко визначеним та включає 7 пунктів, від спроб незаконного захоплення повітряного судна

(ПС) до свідомого надання неправдивої інформації про загрозу як для ПС, так і для об'єктів ЦА на землі, пасажирів, екіпажу, наземного персоналу [8, с. 60–64]. Узагальненням інформації щодо зафіксованих актів незаконного втручання займається Міжнародна організація цивільної авіації (ІКАО), одним з аспектів роботи якої є забезпечення безпеки авіаперевезень [9; 10, с. 201–205].

Аналіз структури АНВ може дати розуміння того, яким чином змінилися підходи злочинців щодо здійснюваних ними атак на ЦА. Так, у минулому ХХ столітті найбільша кількість АНВ була зафіксована у 1993 році та становила 48 випадків. За даними ІКАО [11, с. 14] того року по всьому світу було здійснено 30 нападів на ПС; 7 спроб таких нападів; 3 напади на об'єкти ЦА та 8 інших АНВ. У результаті атак 38 людей отримали поранення та 112 людей загинули. З того часу технічні можливості для здійснення нападів у злочинців лише збільшилися. Тому і статистика ІКАО щодо АНВ також розширилася. На рис. 2 представлено структуру АНВ у 2022 році, коли була зафіксована найбільша кількість АНВ за останні 30 років. У 2022 році зафіксовано 2 кібератаки, також мали місце 2 випадки використання авіації як зброї.

У цілому проведений аналіз дає змогу дійти висновку про те, що незважаючи на вживані заходи щодо забезпечення безпеки ЦА, у злочинців залишається багато можливостей щодо варіювання методів атак.

Очевидно, що персонал об'єктів ЦА відноситься до групи ризику з причин можливості потенційного впливу на їх діяльність ззовні. Тож,

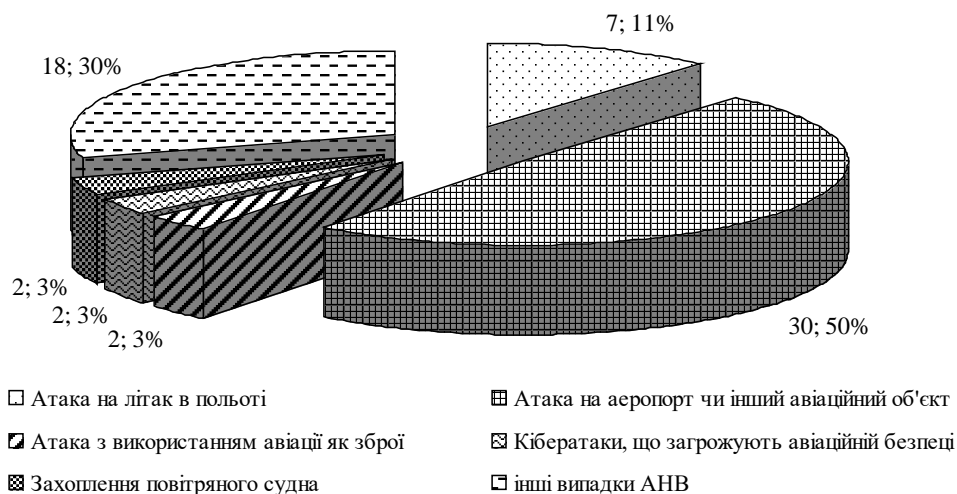


Рис. 2. Структура актів незаконного втручання у світі за типом інциденту у 2022 році

Джерело: складено автором на основі [12]

підкуп чи вербування співробітників об'єктів ЦА є одним зі способів організації АНВ [6, с. 12].

Зазначені дії щодо, наприклад, прибиральниці аеропорту чи ПС, можуть здійснюватися з метою подальшого спонукання особи до пронесення вибухового пристрою для вчинення АНВ. Однак підкуп та вербування здійснюються не лише для здійснення актів тероризму. Дуже часто подібні способи налагодження контакту зі співробітниками режимних установ здійснюються з метою контрабанди заборонених товарів (наркотичних речовин, цінних речей, предметів антикваріату), а також задля забезпечення трафіку з торгівлі людьми. Незалежно від мети, з якою здійснюється підкуп та вербування співробітників суб'єктів ЦА, подібні дії є протиправними та караються законом відповідно до національного законодавства тієї країни, де такий злочин було скоєно.

Завдання щодо попередження АНВ та загалом всіх протиправних дій проти ЦА покладено на службу авіаційної безпеки (САБ). Однак, не дивлячись на те, що на САБ покладено завдання із забезпечення безпеки, фіксуються випадки, коли саме співробітники САБ використовуються злочинними угрупованнями та терористичними організаціями для здійснення протиправних дій, що несуть шкоду чи створюють загрози та ризики безпечному функціонуванню ЦА.

Контент-аналіз відкритих джерел щодо випадків залучення співробітників САБ у злочинні схеми продемонстрував, що такі факти та інциденти можна умовно розділити на дві великі групи. Критерієм для сегментації виступає цільова установка злочинців щодо вербування (підкупу) співробітників САБ. З одного боку, вербування співробітників САБ проводиться з метою здійснення терористичного акту, з іншого – «економічна складова», тобто організація контрабанди заборонених речей, людей, підакцизних та підсанкційних товарів, виробів культурного та історичного значення, предметів старовини та ін.

Розглянемо більш докладно випадки підкупу та вербування співробітників ЦА за двома виділеними групами. У першому випадку саме завербована особа допомогла озброєним бойовикам безпечно проникнути в контрольовану зону аеропорту м. Донецьк під час захоплення летовища у 2014 році [6, с. 4–16]. Ще одним прикладом вербування співробітника аеропорту з метою вчинення терористичного акту стала катастрофа ПС Airbus A321 31 жовтня 2015 року, що виконував рейс № 9268 [13]. Причиною катастрофи фахівці-розслідувачі називають терористичний акт, який

було скоєно завдяки закладеному на борт ПС вибуховому пристрою. Слідство припускає, що вибуховий пристрій у ПС міг підкласти працівник аеропорту, підкуплений синайським відділенням «Ісламської держави». Вважається, що вибух було здійснено завдяки співробітнику аеропорту, який займався завантаженням багажу пасажирів та мав доступ на льотне поле. Відразу після того, як зловмисник помістив бомбу на борт ПС, терорист залишив своє робоче місце і втік з аеропорту. Щодо випадків вербування з метою отримання благ яскравим прикладом може служити приклад організації трафіку наркотиків через аеропорт Пуерто-Ріко в особливо великому обсязі (понад 20 тон кокаїну). Як відомо, у 2017 звинувачення були висунуті щодо 12 чинних та колишніх службовців, які могли бути задіяні у контрабанді.

Проаналізувавши існуючі методи з підбору персоналу нами було виокремлено традиційні, що передбачають обмеження щодо віку, відсутності судимості, наявності спеціальної освіти та громадянства [14].

Поруч з традиційними методами у різних режимних установах досить часто у практиці використовується так зване психофізіологічне інтерв'ю або просто – «поліграф», який істотно доповнює, а часто й перевершує інші методи одержання інформації. При цьому метод поліграфу є високорентабельним, оскільки перевірка займає набагато менше часу й коштує за загальним підрахунком значно дешевше, ніж тривалі кадрові перевірки. За твердженням експертів, використання поліграфу на 25% підвищує ймовірність того, що кандидат на роботу виявиться благонадійною та чесною людиною [15, с. 17–22].

Також в рамках реформи митної служби в 2021 році в Україні було запроваджено багату-ступеневе тестування посадовців митних органів щодо рівня їх компетенцій та благонадійності. На першому етапі передбачається перевірка професійних знань, що стосуються митного та антикорупційного законодавства. На другому етапі використовується GENERAL SKILLS TEST (Тест загальних навичок). Що стосується третього етапу тестування, то саме він спрямований на визначення рівня благонадійності посадовців. Свого часу проводилася подібна перевірка суддів на добросовісність за допомогою використання тестів HCS Integrity Check та BFQ-2. Основним завданням пілотного проекту щодо тестування посадовців митних органів на благонадійність є виявлення особистісних схильностей людини на здійснення протиправних дій на робочому місці.

Зміст тестів другого та третього етапу є секретним, тобто є закритими та не підлягають публічному оприлюдненню [16]. Одним із ефективних методів виявлення неблагонадійних осіб серед співробітників режимних установ також є комплекс психологічних тестів, розроблених ізраїльською компанією Midot. Послугами компанії користується, доречі, одна з найбільш безпечних авіакомпаній світу – EL AL. Методика Midot розрахована на оцінку благонадійності співробітників впродовж всього періоду роботи починаючи з відбору і закінчуючи звільненням. Інструменти оцінювання благонадійності співробітників за методикою Midot включають 150 тестів, що розподілені за сімома блоками. За результатами тестування кандидата на посаду автоматично формується звіт про його благонадійність, ймовірність здійснення протиправних вчинків, деструктивної поведінки у майбутньому.

Висновки. У результаті проведеного дослідження встановлено, що ризики для ЦА знаходяться в площині не лише прямого впливу збройних конфліктів, але також можуть виникати в результаті АНВ. Зокрема, підкуп та вербування співробітників САБ представляє доволі серйозну загрозу безпеці ЦА, й ці ризики багатократно зростають, оскільки в злочинних схемах та терористичних актах використовуються ті, хто повинен ці загрози попереджати та нівелювати. Окрім цього проаналізовано деякі методи, що використовуються у різних галузях господарювання з метою «відсіювання» неблагонадійних співробітників.

Перспектива подальших наукових досліджень полягає у виокремленні серед існуючих методів таких, які б дозволили по-перше перешкодити працевлаштуванню неблагонадійних осіб до САБ, по-друге, якщо ж все ж такі особи потрапили на посаду служби – допомогти їх ідентифікувати й таким чином попередити можливий злочин.

Список літератури:

1. Ситник Г.П. Воєнно-політичні конфлікти та міжнародна безпека. Київ. ТОВ «САК Лтд», 2023. 92 с.
2. Бабкіна О.В., Горбатенко В.П. Політологія: навчальний посібник. Київ: ВЦ, 2016. 568 с.
3. Індекс війни. Моніторинг воєнних конфліктів у світі 2023 року: офіційний сайт Недержавного аналітичного центру «Українські аналітичні студії стратегічних досліджень». Київ. 2023. 80 с. URL: <https://ussd.org.ua/2024/01/23/indeks-vijny-monitoryng-voyennyh-konfliktiv-u-sviti-2023-roku/> (дата звернення: 15.09.2024).
4. About the НПК: офіційний веб-сайт The Heidelberg Institute for International Conflict Research (НПК). 2023. URL: <https://hiik.de/hiik/organization/?lang=en> (дата звернення: 15.09.2024).
5. Conflict Barometer, 2022. 31th Annual Conflict Analysis. Heidelberg: НПК, 2023. 181 р. URL: https://hiik.de/wp-content/uploads/2023/05/CoBa_2022_00_01.pdf (дата звернення: 15.09.2024).
6. Стратонов В.М., Мусієнко А.Д., Рубан А.П. Аналіз випадків державного тероризму щодо повітряних суден цивільної авіації. *Авіаційно-космічна техніка і технологія: Науково-технічний журнал*. Харків: ХАІ, 2023. – Т. 38, № 2. С. 4-16.
7. Повітряний кодекс України: закон України від 19 травня 2011 року № 3393-VI з останніми змінами та доповненнями № 3232-IX від 13.07.2023 р. URL: (дата звернення: 15.09.2024).
8. Мошняга Л.В., Єрмоленко-Князева Л.С. Акти незаконного втручання в діяльність цивільної авіації: теоретико-правовий аналіз. *Правовий часопис Донбасу / Law journal of Donbass*. 2024. № 1(86). С. 60-64.
9. About ICAO: офіційний веб-сайт The International Civil Aviation Organization (ICAO). 2024. URL: <https://www.icao.int/about-icao/Pages/default.aspx> (дата звернення: 15.09.2024).
10. Філіппов А.С. Незаконні акти стосовно цивільної авіації: сучасна концепція в міжнародному праві. *Підприємництво, господарство і право*. 2017. № 4. С. 201-205.
11. Appendix 1. Tables relating to the World of air transport in 2015: 2024. URL: https://www.icao.int/annual-report-2015/Documents/Appendix_1_en.pdf (дата звернення: 15.09.2024).
12. Annual Reports of the Council (1995-2023): офіційний веб-сайт The International Civil Aviation Organization (ICAO). 2024. URL: <https://www.icao.int/about-icao/Pages/annual-reports.aspx> (дата звернення: 15.08.2024).
13. Єгипет розслідує версію вибуху А321: BBC News Україна. URL: https://www.bbc.com/ukrainian/news_in_brief/2015/11/151109_she_egypt_inquiry_a321 (дата звернення: 15.08.2024).
14. Про затвердження Програми підготовки персоналу з авіаційної безпеки: наказ Міністерство транспорту та зв'язку України від 18.06.2007 року № 508 URL: <http://consultant.parus.ua/?doc=04290EC052> (дата звернення: 15.08.2024).
15. Дектярєва Т.В. Визначення надійності кандидатів на роботу із використанням поліграфа. *Правничий вісник Університету «КРОК»: Проблеми психології*. 2012. № 4. С. 17-22.
16. Савченко О.С. Реформа митних органів. Офіційний сайт «МЕТА-consulting». 2021. URL: <https://meta-consulting.com.ua/blog/testi-dlia-mitno-sluzhbi/> (дата звернення: 15.08.2024).

Stratonov V.M., Yurchenko D.S. ANALYSIS OF THE SECURITY STATE OF CIVIL AVIATION: RISKS OF RECRUITMENT AND BRIBERY OF AVIATION SECURITY SERVICE EMPLOYEES

The article deals with current issues of the security status of civil aviation in Ukraine and the world. Modern challenges and threats require constant analysis of the state of aviation security in order to find adequate and effective measures to strengthen it. The intensity of conflicts in the world over the past 10 years has been analyzed. Risks for the safe functioning of civil aviation are not only directly affected by armed conflicts, but may also arise as a result of acts of unlawful interference. The conducted analysis of acts of unlawful intervention in the world showed that over the past few decades, the opportunities of criminals and terrorists to carry them out have only increased. Cases of terrorist attacks (by types) in 1993 and 2022 are compared. In 1993, most involved attacks on aircraft, and in 2022, most involved attacks on airport infrastructure or other aviation facilities, the analysis found. In this year 2022, the largest number of acts of illegal attacks was recorded in the last 30 years. Such facts and trends confirm the thesis that despite the measures taken to strengthen the security of civil aviation, criminal groups still have many opportunities to carry out attacks. At the same time, there are occasional cases of bribing or recruiting employees of aviation security services by criminal groups for the purpose of carrying out terrorist acts or other illegal actions. In addition, the work analyzed the existing methods that are used at the stages of selection and acceptance of employees whose work is related to security: customs officers, judges, etc. Effective means of checking are – passing a check with the help of a polygraph, passing a special test consisting of several stages, etc. Therefore, an important task at the current stage of the formation of an effective system of ensuring aviation security is the identification of non-charitable persons among employees of the aviation security service.

Key words: *civil aviation, aviation security service, acts of unlawful interference, aviation security, bribery, recruitment, personnel security.*

ЕЛЕКТРОТЕХНІКА

УДК 621.3.049.75

DOI <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2024.5.1/03>**Білевська О.С.**Український науково-дослідний інститут спеціальної техніки та судових експертиз
Служби безпеки України

ГНУЧКІ ДРУКОВАНІ ПЛАТИ. АНАЛІЗ СУЧАСНИХ МОЖЛИВОСТЕЙ

Комунікаційне, автомобільне та медичне обладнання, аерокосмічна промисловість, сільськогосподарська тощо – сфери які постійно розвиваються та потребують досконалості у виготовленні сучасного обладнання.

У статті визначено, що сучасне виготовлення друкованих плат потребує постійного удосконалення методів розробки з урахуванням вимог сучасної елементної бази та використання новітніх технологій виробництва з сучасними матеріалами. Розвиток електронної техніки вимагає комплексного підходу та удосконалення на всіх етапах виробництва: проектування, виборі елементної бази та матеріалів, виборі технології виконання як усього виробу, так і окремих вузлів. При розробці будь-якої апаратури практично нероздільним є зв'язок між схемотехнікою, конструюванням та технологічним процесом виготовлення.

Безпосередньо це стосується друкованих плат, які повинні відповідати всім вимогам використання у виробі сучасної електроніки та мікроелектроніки. Друковані плати є невід'ємною складовою частиною при конструюванні електронних вузлів будь яких електротехнічних виробів від побутової до високотехнологічної техніки та одним з показників надійності, функціональності, швидкодії та компактності електронних пристроїв.

Друковані плати на жорсткій основі (жорсткі плати) є основним видом плат, клас точності яких постійно підвищується завдяки удосконаленню електронних компонентів. Однак сучасна електроніка все частіше вимагає використання жорстко гнучких та гнучких друкованих плат.

У статті розглянуто основи технології виготовлення гнучких друкованих плат, яка розвивається завдяки можливостям виготовлення їх з поліамідів, рідкокристалічних полімерів та інших матеріалів, що дає можливість виготовлення пристроїв мінімізованих розмірів та нестандартних форм.

В статті з'ясовано, що розробка та виготовлення друкованих плат на гнучкій основі дає можливість зрозуміти переваги даного виду перед платами виконаними на жорсткій основі. Безперервне удосконалення електронних компонентів для складання друкованих вузлів, враховує можливості їх використання на гнучких друкованих платах.

Ключові слова: друкована плата, друкований вузол, жорстка основа, гнучка основа, електронні компоненти.

Постановка проблеми. Новітня електроніка дозволяє вирішувати різноманітні задачі майже у всіх сферах життєдіяльності. Це потребує постійного розвитку нових технологій виготовлення друкованих плат, розробка яких повинна враховувати вимоги до конструктивних форм та параметричних показників виробів.

Актуальним у вирішенні цього питання для розробників та виробників є розробка високо-технологічних процесів випуску гнучких друкованих плат (ФРС) та якісних основ для гнучких друкованих плат. Удосконалення матеріалів основ гнучких друкованих плат та технології їх виготов-

лення дають можливість використання їх у корпусах будь-яких нестандартних форм з дотриманням всіх електричних вимог.

Аналіз останніх досліджень та публікацій. Доцільністю використання та технологіями виготовлення гнучких друкованих плат, вирішенням проблемних питань цих процесів займалися такі вітчизняні науковці: Євсіна Н.О., Дудник О.В., Зінгер Ю.Л., Адаменко Ю.Ф., Яцюк Л.А., Косогін О.В. та інші.

Серед вітчизняних виробників друкованих плат з високою якістю виробництва та дотриманням сучасних технологічних процесів можна

відзначити фірми PCBETAL (потужності виробництва знаходяться у м. Олександрія), СК-ТЕХНО (м. Київ) тощо.

Закордонні фірми, такі як BETON, KING-PCB, NOVA TECHNOLOGY, є представниками виробництва високоякісних, високоточних плат з передовими технологіями та мають можливість розробки і освоєння нових технологій. Якість виробництва підтверджена американською та європейською сертифікацією UL (UL E 492586), TS 16949 і сертифікатом менеджменту якості ISO9001:2008. А.В. Орещенко.

Постановка завдання. Метою даної статті є визначення доцільності виготовлення гнучких друкованих плат з використанням передових технологій, розробка та використання гнучких основ з високоточними струмопровідними можливостями, сучасні методи виготовлення гнучких друкованих плат для отримання інноваційних електронних виробів.

Виклад основного матеріалу. В сучасному світі розроблено безмежну кількість різновидів друкованих плат. Кожна з них має свої конструктивно-технологічні особливості, в залежності від сфери застосування приладу для якого вона розроблена. На сьогодні це медичне, автомобільне, комунікаційне обладнання, електроніка безпеки та споживча електроніка, галузі високих технологій, аерокосмічна галузь, сільськогосподарська тощо.

Друковані плати пройшли шлях розвитку від примітивного штампування або вирізання зображення на бронзовій чи мідній фользі на початку XX століття до друкованих плат HDI (High Density Interconnect) – плат з технологією з'єднання високої щільності.

Друкована плата (далі – ДП) – це ізоляційна основа (діелектрик) з одного чи двох боків якої розташовані струмопровідні смужки металу у відповідності з електричною схемою. Вона є панеллю для електричного з'єднання компонентів завдяки відображеному на ній струмопровідному рисунку електричної схеми. Друковані плати призначені для монтажу та комутації окремих блоків приладів між собою. Друковані плати мають жорстку або гнучку основу.

Відповідно до ДСТУ 2646-94 [1]:

Друкована плата – матеріал основи, що вирізаний за розміром, містить необхідні отвори і, щонайменше, один рисунок.

Друкований вузол – друкована плата з приєднаними до неї електричними і механічними елементами і (або) іншою друкованою платою

і з виконаними всіма процесами обробки: паяння, покриття і т.д.

Рисунок друкованої плати – конфігурація провідникового і (або) діелектричного матеріалу на ДП.

Провідний рисунок – рисунок ДП, утворений провідниковим матеріалом.

Матеріал основи ДП – матеріал, на якому виконується рисунок ДП.

Види друкованих плат:

Одностороння друкована плата (ОДП) – друкована плата, на одній стороні якої виконаний струмопровідний рисунок.

Двостороння друкована плата (ДДП) – друкована плата, що має одну основу, на обох сторонах якої виконаний струмопровідний рисунок і всі необхідні з'єднання.

Багатошарова друкована плата (БДП) – друкована плата, що складається з шарів ізоляційного матеріалу, які чергуються, зі струмопровідними рисунками на двох або більше шарах, між якими виконані необхідні з'єднання.

Гнучкі друковані кабелі (ГДК) або шлейфи складаються з одного чи декількох непровідних шарів, на яких розміщені друковані провідники. Гнучкі кабелі добре витримують велике число перегинів, вібрацію і застосовуються для міжз'єднань вузлів і блоків. Вони в кілька разів легше і займають менші обсяги ніж круглі кабелі.

Гнучка друкована плата (далі – ГДП) – друкована плата, яка має гнучку основу, що дозволяє згинати її з визначеним радіусом, звертати у циліндр і т.п. ГДП почали застосовуватися в 50-х роках XX століття. Поштовхом до цього стала розробка поліамідів з діелектричною провідністю та поліефірних плівок, які стають гнучкою основою. Перехідним етапом до гнучких друкованих плат були гнучкі друковані кабелі. Створення матеріалів з діелектричними властивостями зробили можливим розміщення на гнучкій основі електронних компонентів. Це зробило можливим розробку жорстко-гнучких, а в подальшому – ГДП.

Жорстка-гнучка друкована плата представляє собою гібрид або комбінацію жорстких і гнучких типів друкованих плат [2]. Вона має шар схеми, який не згинається (так звана «жорстка» частина), а також шари гнучких схем, які можна згинати і складати. Ця жорстка гнучка конструкція друкованої плати дозволяє використовувати плату в електричних або електронних пристроях які вимагають, щоб друкована плата вигиналася або складалася у визначених місцях. В цілому, технологія жорстких-гнучких друкованих плат є відмінним рішенням для багатьох типів електроніки, які

вимагають, щоб плата вигиналася або складалася у визначених областях, зберігаючи при цьому міцність і надійність, або де перевагою є стійкість до ударів і вібрації.

ГДП легко згинаються за визначеним радіусом, скручуються в циліндри, мають гарне розсіювання тепла, вони легкі та тонкі, що зменшує об'єм та вагу виробу.

Розглянемо основні переваги ГДП:

- гнучкість – надавати форму відповідно до пристрою в якому буде застосована. Це дає можливість економії витрат та ваги, оскільки одна ГДП може бути використана для покриття області пристрою, де необхідно розмістити декілька жорстких друкованих плат. Гнучкість також означає більшу надійність та довговічність, бо може зменшити вплив вібрації. ГДП не має потреби в інтерфейсних з'єднаннях, таких як паяльні з'єднання, контактні обтискання та з'єднувачі;

- стійкість до впливу навколишнього середовища – це досягається завдяки використанню сучасних матеріалів для ГДП. Матеріали можуть бути водонепроникними, ударостійкими, корозійностійкими та стійкими до високих температур. Цю перевагу не можуть мати жорсткі друковані плати;

- більша свобода дизайну плат, вона тонка та легка, що значно зменшує простір та веде до мінімізації пристроїв;

- призначені для робочих умов, де температура та щільність є головним фактором;

- відмінні електричні характеристики та діелектричні властивості; дають можливість швидко передавати електричні сигнали та забезпечувати хорошу роботу компонентів виробів;

- висока надійність монтажу та експлуатації; продуктивність та ефективність збільшується за рахунок зменшення проводів та з'єднувачів на платі;

- низька вартість – тонкі та легкі матеріали ГДП впливають не тільки на розмір та зменшення вартості пристрою, а також зменшується розмір упаковки, кінцевої збірки та витрати на матеріали.

Недоліки ГДП:

- потребує висококваліфікованого персоналу для монтажу;

- майже неремонтопридатна та не підлягає корегуванню;

- підвищений ризик пошкодження при використанні;

- висока одноразова початкова вартість замовлення на виготовлення.

Сучасні технології дозволяють випускати ГДП в односторонньому, двосторонньому та вже

і у багатошаровому форматі. Інноваційною є розробка 4-шарової основи для гнучкої друкованої плати з технологією сліпих переходів, що забезпечує більш компактні розміри плати з високою щільністю трасування.

Для виготовлення ГДП використовують гнучкі ламінати [4]. Гнучкі друковані плати на гнучких ламінатах однаково ефективно складаються як в пристрій для одноразового гнучкого встановлення плати, так і для динамічного використання протягом усього терміну служби пристрою.

Гнучкі ламінати тонкі і забезпечують можливість складання електронного дизайну, не втрачаючи при цьому електричної безперервності. Вони не мають склотканини для опори та виготовляються з еластичних матеріалів, таких як пластик. Пластик є хорошим ізолятором, проте, завдяки сучасним досягненням у хімії, фізиці та електроніці, може мати гарні струмопровідні властивості. Нові досягнення у дослідженні струмопровідних полімерів доводять, що органічні матеріали можуть змінюватися від традиційних ізоляторів до напівпровідників.

Розглянемо матеріали, які використовуються для виготовлення ГДП:

- поліаміди – цей тип ламінату забезпечує надзвичайну екологічну стійкість [4]. Він має високі термічні, хімічні та механічні властивості. Це високомолекулярний полімер на основі похідних тетракарбонових кислот, який здатний працювати при температурі 500°C. Стійкі до низьких температур. Поліамідний ламінат ідеально підходить для складних застосувань, у таких галузях як телекомунікаційні, оборонні, аерокосмічні, автомобільні тощо;

- рідкокристалічний полімер (Liquid-crystal polymer, далі – LCP) – в електронній галузі використовують термотропний LCP, який при розплавленні має властивості рідких кристалів та має чудові властивості для малих електронних пристроїв. Цей полімер в основному придатний для масового виробництва лиття під тиском. LCP – матеріал з низькою діелектричною провідністю, має високу термостійкість у безсвинцевому процесі переплавлення, надзвичайно низьке водопоглинання і короткий цикл формування, низьку швидкість усадки (ліотропний LCP – не використовується в електронній галузі);

- мідна фольга, покрита смолою (Resin Coated Copper Foil – RCC) – це ще один базовий матеріал, який широко використовується при конструюванні плат HDI. Характерна відмінність – відсутність склотканини. У стандартній конфігурації

можуть використовуватися три типи фольги товщиною 18 мкм, 12 мкм та 9 мкм;

– відпалена катана фольга – високопластична фольга, яка виробляється шляхом численних послідовних операцій відпалу та прокату до потрібної товщини;

– фоторезистивна плівка FF-9040S. Має чудову адгезію та роздільну здатність, підходить для лужного травлення, не викликає забруднення гальванічного процесу, гарна стабільність після ламінування та експонування;

– лавсан фольгований марки ЛФ-1, що складається з лавсанової плівки, епоксикаучукового адгезиву і електролітичної мідної фольги підвищеної пластичності, відрізняється стійкістю до значозмінних механічних деформацій, дії розплавленого припою при 204°C протягом 30 секунд, має робочу температуру експлуатації до 150°C;

– поліамід фольгований (ПМФ) – м'який та міцний матеріал, характеризується підвищеною термостійкістю з робочою температурою до 300°C, стабільно високими електрофізичними властивостями у широкому діапазоні частот і напруг, легко протистоїть перепадам температур під час процесу паяння та при перепаюваннях, в процесі коливань температур не змінює форму.

Розробляються також нові струмопровідні фарби та підкладки, щоб відповідати вимогам новітніх застосувань, пропонуючи покращені електричні характеристики, довговічність і екологічність. Крім того, інновації в друкарських технологіях, такі як адитивне виробництво та цифровий друк, дозволяють створювати конструкції схем з вищою точністю, розсуваючи межі можливостей у виробництві електроніки.

Метод виготовлення ГДП залежить від конструкторських та експлуатаційних характеристик, конструктивного виконання, проведення техніко-економічного аналізу [3]. Технологія виробництва повинна забезпечувати високу якість протягом тривалого використання та забезпечення сумісності з існуючими процесами складання ГДП.

Поширеними методами виготовлення ГДП є позитивний комбінований метод, метод переносу та субтрактивний.

Позитивний комбінований метод заснований на застосуванні двостороннього фольгованого діелектрика. Струмопровідний рисунок отримують методом травлення міді, а металізація отворів забезпечується електрохімічним методом. Цей метод забезпечує задовільну адгезію елементів до діелектрика.

Метод переносу передбачає використання тимчасової основи у вигляді пластини із нержавіючої

сталі [5]. На цю основу наносять захисний рельєф на пробільні ділянки і шляхом гальванічного осаджування міді формують струмопровідний рисунок. Після цього захисний рельєф видаляють, тимчасову основу рисунком притискають до діелектрика з нанесеним клеєвим шаром. При цьому струмопровідний рисунок відшаровується від нержавіючої сталі і приклеюється до діелектрика. Даний метод більш придатний для односторонніх плат.

При виготовленні ГДП субтрактивний хімічним методом на мідну фольгу діелектрика захисним шаром, стійким до наступного впливу витравлювачів, наноситься позитивний рисунок схеми [3]. Незахищені ділянки фольги витравлюються. Для захисту струмопровідного рисунка від дії травильного розчину, на нього попередньо наносять захисний рельєф. Цей процес виготовлення нескладний та найменш трудомісткий. У порівнянні з іншими методами виготовлення друкованих плат він має короткий технологічний цикл, легко механізується та автоматизується.

Однак, мінімізація електронних виробів, зростаючі вимоги до щільності компонування елементів на платах, вимагають удосконалення існуючих та розробку нових методів виготовлення друкованих плат. Це, в свою чергу, потребує висококваліфікованої робочої сили, спеціалізованого обладнання та обробки у виробництві.

Так для створення гнучких плат найвищої складності та з високою щільністю монтажу використовують метод з використанням струмопровідних паст. Матеріалами для даного методу є нефольгована лавсанова плівка та струмопровідна металополімерна паста, що містить порошок срібла та полімерний зв'язувальний компонент. Нанесення струмопровідного рисунка забезпечується методом трафаретного друку. Висока електропровідність плат виконаних даним методом забезпечена великим відсотком срібла у складі провідників.

Висновки. Розвиток гнучких електронних технологій несе революційні зміни в промисловості та житті людини. Однією з актуальних задач у даний час є підвищення економічної ефективності виробництва і якості продукції, яка випускається [3]. Зростаючий попит на мініатюрну, гнучку електроніку з застосуванням гнучких друкованих плат стає ключовою тенденцією на ринку.

Застосування гнучких друкованих плат вносить зміни у різні галузі промисловості, включаючи споживчу електроніку, автомобільну промисловість, охорону здоров'я, аерокосмічну технологію тощо. Виробництво гнучких друко-

ваних плат пропонує більшу свободу дизайну, що дозволяє створювати інноваційні та ергономічні вироби – від гнучких дисплеїв та датчиків дотику до RFID-антен і розумного текстилю. Гнучкі плати все частіше інтегруються в повсякденні пристрої, підвищуючи їхню продуктивність, одночасно зменшуючи розмір і вагу. Придатні для більш суворих умов використання завдяки більшій стійкості до ударів та вібрацій. Процес друку в рулон та раціональне використання матеріалів уникає

проблеми відходів від фотолітографії. Вартість гнучкої плати виготовленої методом друку значно нижча за вартість методу фотолітографії.

Гнучка друкована плата є ключовим аспектом у розробці сучасної електроніки. Науковці, інженери та виробники продовжують розширювати межі можливостей у швидкій еволюції розробки та виробництві гнучких друкованих плат, що є важливим етапом для створення інноваційної гнучкої електроніки.

Список літератури:

1. ДСТУ 2646-94 Плати друковані. Терміни та визначення.
2. Гарист А. В. Технологія жорстких гнучких друкованих плат (RIGID-FLEX PCB). VII Міжнародна науково-практична конференція «Information technologies in education, technology and industry», Технічні науки.
3. Євсіна Н.О., Дудник А.В. Конструювання і технологія виробництва систем телекомунікацій: Конспект лекцій для студентів спеціальності 172 «Телекомунікації та радіотехніка» усіх форм навчання – Харків: НТУ «ХП», 2022.
4. Зінгер Я.Л., Адаменко Ю. Ф. Наскрізна розробка інтелектуальної техніки. Частина 2 конспект лекцій. – Київ КПІ ім. Ігоря Сікорського 2023 р.
5. Яцюк Л. А., Косогін О.В., Ущатовський Д. Ю., Лінючева О. В., Фатєєв Ю. Ф. Технологія нанесення неметалевих покриттів та виробництво плат друкованого монтажу – Київ, КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2018 р.

Bilevska O.S. FLEXIBLE PRINTED BOARDS. ANALYSIS OF CURRENT OPPORTUNITIES

Communication, automobile and medical equipment, aerospace industry, agricultural, etc. are areas that are constantly developing and require perfection in the production of modern equipment.

The article defines that the modern production of printed circuit boards requires constant improvement of development methods taking into account the requirements of the modern elemental base and the use of the latest production technologies with modern materials. The development of electronic equipment requires a comprehensive approach and improvement at all stages of production: design, selection of the elemental base and materials, selection of technology for the execution of both the entire product and individual components. In the development of any equipment, the connection between circuit engineering, design and manufacturing process is practically inseparable.

This directly applies to printed circuit boards, which must meet all the requirements for use in modern electronics and microelectronics products. Printed circuit boards are an integral part of the design of electronic components of any electrical products from household to high-tech equipment and are one of the indicators of reliability, functionality, speed and compactness of electronic devices.

Rigid-based printed circuit boards (rigid boards) are the main type of boards, the accuracy class of which is constantly increasing due to the improvement of electronic components. However, modern electronics increasingly require the use of rigid and flexible printed circuit boards.

The article discusses the basics of the technology of manufacturing flexible printed circuit boards, which is developing due to the possibilities of manufacturing them from polyamides, liquid crystal polymers and other materials, which makes it possible to manufacture devices of minimized sizes and non-standard shapes.

The article found out that the development and manufacture of printed circuit boards on a flexible basis makes it possible to understand the advantages of this type over boards made on a rigid basis. The continuous improvement of electronic components for the assembly of printed circuit boards takes into account the possibilities of their use on flexible printed circuit boards.

Key words: *printed circuit board, printed circuit board, rigid base, flexible base, electronic components.*

Гарист А.В.

Український науково-дослідний інститут спеціальної техніки та судових експертиз
Служби безпеки України

ТЕХНОЛОГІЯ АВТОМАТИЧНОГО МОНТАЖУ ДРУКОВАНИХ ПЛАТ

Сучасні тенденції при виготовленні електронного обладнання характеризуються прагненням до збільшення функціональності пристроїв та одночасно зменшення їх габаритних параметрів. В результаті можна отримати велику кількість якісних та недорогих за собівартістю виробів. Стаття присвячена огляду основ та принципів технології автоматизованого монтажу, який є оптимальним і найбільш затребуваним варіантом для великосерійного виробництва.

В статті з'ясовано, що якість зібраного електронного модуля залежить від дотримання технології монтажу. До проектної документації для автоматизованого поверхневого монтажу висуваються певні вимоги: монтажна схема та складальні креслення з зазначенням висоти комплектуючих, способу формування, полярності, ключів елементів та позиційних значень, а також специфікація з повним найменуванням та позиційним позначенням компонентів.

В статті визначено, що автоматизований монтаж друкованих плат – це процес заздалегідь запрограмований і відбувається практично без участі оператора. При виробництві використовують багатофункціональне автоматичне обладнання. Воно дозволяє монтувати на друкованій платі понад 50000 елементів за годину, що особливо актуально при великосерійному виробництві. Виводи SMD-компонентів мають мініатюрні розміри та припаюються до точок контактних площинок на поверхні плат. Тому дуже важлива точність установки елементів, що досягається із застосуванням новітнього автоматичного обладнання.

У статті розкрито, що технологія поверхневого монтажу стає оптимальним способом виробництва плат. Якщо раніше при їх виготовленні використовувалися переважно навісні компоненти, то сьогодні понад 90% елементів друкованих плат – це SMD елементи. Якщо фіксація DIP-компонентів здійснюється на спеціальних станціях або вручну, то процес встановлення SMD елементів більш ніж на 95% автоматизується. Людська праця під час поверхневого монтажу потрібна для налаштування автоматичного обладнання, завантаження заготовок та елементів на конвеєрні лінії.

Ключові слова: друкована плата, автоматизований монтаж, SMD-монтаж, THT-монтаж, трафарет.

Постановка проблеми. Автоматизований монтаж – це основа сучасної мікроелектронної промисловості. Він використовується для виробництва продукції практично у всіх галузях, від виготовлення побутових приладів до виробництва верстатів, військової техніки, літаків, космічних апаратів тощо.

В статті розглянуті основні переваги та проблемні питання при автоматичному монтажі, а також описано технологічні процеси при автоматичному наскрізному та поверхневому монтажі.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Дослідженнями проблемних питань, які виникають на різних етапах автоматичного монтажу, займалися такі закордонні науковці, як Діксон Д. [1], Біксенман Д. [2], Агарвал Н. [3] та інші.

У той же час, незважаючи на значну кількість наукових публікацій присвячених різним технологіям автоматичного монтажу, дослідження

з метою покращення якості та уніфікації продовжуються. Стрімкий розвиток технологій дозволяє вдосконалювати компоненти та матеріали які використовуються в технологічному процесі, що зумовлює потребу в подальших дослідженнях цієї тематики.

Постановка завдання. Метою даної статті є розгляд питання по основах та принципах технології автоматичного монтажу друкованих плат. Описаний процес та технологія дозволяє обирати оптимальний варіант при виготовленні виробів, виконаних на THT або SMD-елементах за допомогою автоматичного монтажу, що дозволяє уникнути помилок та прискорити процес виробництва. Автоматичний монтаж друкованих плат особливо цінується в умовах великосерійного виробництва, коли ручною працею неможливо забезпечити обсяг та швидкість роботи.

Виклад основного матеріалу. Поверхневий монтаж друкованих плат означає кріплення

(паяння) електронних компонентів на контактні платинки, які розташовані на поверхні плати. На відміну від цього, об'ємний або наскрізний монтаж передбачає кріплення компонентів у спеціально розмічені на платі отвори. Тому технологія наскрізного монтажу має абревіатуру ТНМ (through hole mounting – монтаж в отвори).

Технологія поверхневого монтажу друкованих плат має декілька абревіатур:

SMT – surface mounting technology (технологія монтажу на поверхню);

SMD – surface mounted device (поверхневий пристрій), електронний компонент, який монтується на поверхню плати.

Найчастіше для позначення поверхневого монтажу друкованих плат використовують назви SMD-технологія монтажу, SMD-монтаж або просто SMD.

При автоматичному монтажі електронні компоненти та вузли встановлюються на поверхню друкованої плати за допомогою спеціалізованого обладнання, яке так і називається – установники компонентів.

Так як при складанні електронних вузлів на друкованих платах використовуються різні види монтажу, то й установники поділяються на кілька типів, а саме:

- установники вивідних (ТНТ) компонентів;
- установники поверхнево-монтажних (SMD) компонентів;
- установники змішаного типу, які можуть працювати як з ТНТ, так і з SMD-компонентами.

Основна функція апарату – це вибір відповідних елементів та його точне центрування на платі. Компоненти заздалегідь фіксуються точками за допомогою клею та паяльної пасти, після чого апарат здійснює певний тиск, щоб закріпити елемент на платі. Автоматична процедура проводиться з максимальною точністю, що зводить до мінімуму можливий брак та дефекти виробу.

Суть технології ТНТ-монтажу полягає в тому, що перед паянням на друкованій платі компоненти розміщуються таким чином, що їх виводи встановлюються у наскрізні отвори плати і припаюються. Такий тип монтажу є основою сучасних технологій виробництва електронних модулів. Тобто одночасно з появою друкованих плат з'явився і вивідний монтаж. Спочатку він проводився лише вручну. Поступово ТНТ-монтаж відходить у минуле, поступаючись місцем технології поверхневого монтажу, проте вивідний монтаж продовжує використовуватись у багатьох пристроях та галузях промисловості, де існують під-

вищені вимоги до надійності, це блоки живлення, високовольні схеми моніторів, силові пристрої, автоматичні пристрої для атомних станцій тощо. Тому були розроблені автоматизовані установники ТНТ-компонентів, які мають набагато більшу продуктивність, ніж такий самий вивідний монтаж вручну.

Використання автоматів з ТНТ-монтажу на виробництві, крім збільшення швидкості монтажу в отвори, має додаткові переваги:

- надійність;
- нижча собівартість кінцевого продукту;
- висока точність вивідного монтажу;
- автоматичний контроль;
- монтаж мініатюрних елементів;
- розташування компонентів на мінімальній відстані один від одного;
- автоматичне підрізування та підгинання виводів зі зворотного боку плати.

У SMT-технології використовують спеціальні електронні компоненти (SMD-компоненти). Їх специфіка полягає у відсутності традиційних дрітних виводів, властивих наскрізному монтажу. Замість установки в спеціальні монтажні отвори такі компоненти припаюються своїми контактами безпосередньо до контактних площинок друкованої плати. Їх правильне положення, а також міцність паяного з'єднання забезпечуються за рахунок поверхневого натягу розплавленого припою.

Технологічний процес поверхневого монтажу поділяється на кілька етапів. Перша частина робіт – підготовча. Електронні компоненти проходять вхідний контроль якості та перераховуються. Далі їх у встановленій послідовності доставляють на ділянки монтажу та встановлюють у живильники.

Автоматичний монтаж друкованих плат під час підготовки включає метод панелізації – проектування масиву плат щоб одержати єдину деталь. Це дозволяє зробити групову заготовку із однакових плат. Панелізація або мультиплікування необхідно, коли використовуються пристрої поверхневого збирання компонентів SMD.

Другий етап – це нанесення паяльної пасти. Для паяння елементів та утримання їх на поверхні плати до моменту утворення паяного з'єднання використовується паяльна паста, яка є порошкоподібним припоєм з додаванням флюсу, різних активаторів і присадок. Паста має гелеподібну консистенцію і повинна забезпечувати очищення контактних площинок друкованої плати і компонентів від оксидної плівки, та інших домішок, які заважають утворенню паяного з'єднання, а також

утримання компонента на поверхні плати до моменту паяння, тобто мати клеючі властивості.

Розрізняють два методи нанесення паяльної пасти, це дозування та трафарет.

При нанесенні паяльної пасти методом *дозування* автоматичні установки з дозаторами наносять паяльну пасту безпосередньо на контактні площинки друкованої плати, при цьому використовуються паяльні пасти низької в'язкості. Цей метод дозволяє наносити паяльну пасту поверх вже нанесеного шару. Спочатку паста наноситься згідно з налаштуваннями програмного забезпечення, які використовуються за замовчанням на підставі введених САД-даних. Тим не менш, у користувача є можливість змінювати обсяг паяльної пасти, що наноситься, область нанесення, висоту і кількість шарів пасти для кожної окремої контактної площинки. Обсяг доз, розмір і форма шару, що наноситься, легко налаштовуються і оптимізуються для кожного окремого компонента і контактної площинки на платі. Цей метод дозволяє працювати з найбільш складними платами та компонентами найбільш складної конструкції та оптимізувати роботу існуючої виробничої лінії.

При нанесенні пасти з допомогою *трафарету*, паста наноситься на контактні площинки друкованої плати через трафарет, отвори в якому – апертури – повторюють малюнок, розташування та форму контактних площинок на платі. Нанесення пасти відбувається на автоматичних принтерах трафаретного друку. Ці пристрої оснащені системою технічного зору, що забезпечує точне поєднання трафарету з платою. Паста продавлюється спеціальним ракелем через отвори у трафареті і переноситься на контактні площинки плати. Спеціальні пристрої принтера контролюють різні параметри процесу, такі як швидкість переміщення ракеля, тиск, відрив трафарету від плати, контроль стану, очищення трафарету і т.д.

Якість нанесення паяльної пасти контролює спеціалізоване обладнання 3D оптичної інспекції, яке визначає точність нанесення пасти на контактні площинки, об'єм, а також можливі дефекти. Автоматизований помічник встановлює обсяг та розташування пасти на площинках, передаючи дані оператору.

Наступний етап – встановлення компонентів на плату. Сьогодні існує безліч автоматів, які виконують цю операцію. Вони відрізняються за принципом роботи, конструкцією, продуктивністю, можливостями і призначенням. Встановлення компонентів на плату виконується відпо-

відно до проектною документації за заздалегідь розробленою програмою. Найчастіше в одній лінії можна зустріти два і більше автоматів встановлення компонентів, які виконують певні завдання. Наприклад, швидкісне встановлення простих SMD-елементів та встановлення компонентів, які вимагають високої точності, компонентів великих розмірів або складної форми. Але, незалежно від принципу роботи верстата, основна послідовність дій виглядає наступним чином: захоплення компонента з носія (найчастіше стрічки), його центрування за допомогою відеосистеми або лазера; встановлення компонента на плату. Перед початком монтажу технічний зір пристрою визначає координати реперних точок на платі та вносить поправки на неточність позиціонування плати в робочій області верстата.

Наступний етап – це групове паяння. Паяння зібраних друкованих плат у сучасних автоматичних лініях здійснюється груповим методом у конвекційних, інфрачервоних або парофазних печах. Найбільш високу якість паяння та продуктивність забезпечують конвекційні печі. У цих пристроях зібрана плата переміщається конвеєром між декількома зонами з різною температурою, гаряче повітря в які передається від нагрівачів за допомогою вентиляторів. Це забезпечує рівномірне прогрівання всього виробу, плавне кероване зростання температури до потрібного пікового значення, і подальше поступове охолодження спаяної плати, що запобігає температурному стресу. Спеціальні модулі печі контролюють розподіл потоків повітря всередині робочої зони та видалення з нього продуктів, які виділяються при нагріванні флюсу та активаторів паяльної пасти.

На завершальному етапі відбувається оптичний контроль якості монтажу. Спаяні модулі проходять контроль за допомогою установки автоматичної оптичної інспекції, яка дозволяє розпізнати такі дефекти, як відсутність або зміщення компонентів, утворення перемичок припою між выводами мікросхем, «непропай», ефект холодного паяння та ін. Перевірка відбувається в автоматичному режимі, плати, на яких були виявлені дефекти, сортуються в окремий відсік автоматичного розвантажувача і передаються на ділянку ремонту (якщо це передбачено технологією).

Плати з встановленими компонентами з прихованими выводами, такі як BGA, CSP, QFN та інші, якість паяння яких неможливо визначити за допомогою оптичних систем, проходять додаткову перевірку на установках рентгеноскопічного контролю.

Через високу чутливість SMD-компонентів до температурного впливу та статичної електрики особлива увага приділяється їх збереженню та організації безпеки виробництва. На промислових об'єктах широко застосовуються автоматизовані системи, що підтримують оптимальні умови їх зберігання. Для захисту компонентів і зібраних з них пристроїв від статичної електрики розроблені спеціальні столи та килимки, що забезпечують безпечне стікання розряду через заземлення.

За рахунок наявності зовнішніх і внутрішніх шарів струмопровідного матеріалу та мінімізації компонентів вдається досягти високої щільності їх розміщення на друкованій платі і, отже, зменшити розмір кінцевого виробу. Однак, при монтажі виникають проблеми, які необхідно вирішити:

– недостатній відступ струмопровідного шару від краю. Друковані плати для поверхневого монтажу містять зовнішні та внутрішні шари струмопровідного матеріалу (міді). Щоб метал не зазнав корозії, його покривають захисним шаром. Проблема виникає, якщо струмопровідний шар покриває всю поверхню плати. Згодом на її краях виникають сколи, і захисне покриття в цих місцях порушується, оголюючи метал, який починає зазнавати окислення. Щоб цього не сталося, рекомендується залишити між струмопровідними шарами та краєм плати відступ (мінімальна ширина для зовнішніх – 0,01 дюйма, для внутрішніх – 0,015 дюйма);

– знижена механічна міцність SMD-компонентів. У поверхневому монтажі електронні компоненти припадають до контактних площинок друкованої плати. Це дозволяє розмішувати їх щільніше і використовувати обидві сторони плати, мінімізуючи кінцевий виріб. Однак встановлені таким способом компоненти менш стійкі до механічних навантажень, ніж змонтовані наскрізним монтажем. Вирішити цю проблему можна комбінуючи на одній платі компоненти для наскрізного та поверхневого монтажу, а також використовуючи паяльні анкери.

– висока щільність компонентів. Це водночас і перевага, і складність технології поверхневого монтажу. З одного боку, вона мінімізує розміри електронної продукції та підвищує її ефективність. З іншого – підвищує вимоги до точності проектування плати, розміщення на ній компонентів, нанесення припою і т. д. Через близьке розташування контактних майданчиків та виводів компонентів один до одного зростає ризик утворення дефектів паяння – наприклад, «мостів» припою. Вирішити цю проблему можна лише ретельнішим

проектуванням плат, а також впровадженням технологій автоматизованого оптичного контролю, удосконалених методів паяння, більш якісних витратних матеріалів (флюсів, припоїв тощо).

– чутливість компонентів. Електронні компоненти, що використовуються в сучасній промисловості, чутливі до високих механічних та термічних навантажень, а також до статичної електрики. Особливо це стосується компонентів для поверхневого монтажу, які через невеликі розміри корпусів і виводів швидко нагріваються, що призводить до їх виходу з ладу. Також через малі розміри паяних з'єднань вони схильні до руйнування при ударах і вібраціях. Вирішити проблему дозволяє ретельніше проектування електричних схем, впровадження нових термопрофілів, легкоплавких припоїв.

– деформація друкованої плати. Така проблема найчастіше виникає під час паяння компонентів на друкованій платі. Причина – нерівномірне або надмірне нагрівання плати та компонентів, викликане дефектами самої підкладки або неправильно підібраним температурним профілем паяння. Також деформацію плати може викликати нерівномірний розподіл компонентів по площині, що викликає різне вагове навантаження на різні ділянки плати. Вирішення проблеми – це використання оптимальних температурних режимів паяння та плат, виготовлених з якісних матеріалів, а також ретельне проектування електричної схеми.

– низька якість з'єднання. При паянні електронних компонентів рідкий припій змочує поверхню контактної площинки та виводу елемента, а при охолодженні утворює паяне з'єднання. Через порушення технології та/або використання некоректно підібраної паяльної пасти, присутності забруднень на поверхнях, які з'єднуються, склад застигає з різними дефектами – наприклад, утворює опуклий меніск замість увігнутого, стає пористим і крихким. Для вирішення цієї проблеми потрібно правильно вибирати паяльну пасту та її дозування, здійснювати попереднє очищення плати від забруднень, використовувати флюси.

Найважливіша перевага технології поверхневого монтажу – економічність виробничих процесів завдяки автоматизації етапів складання та зниження кінцевої вартості. Паяльна паста використовується в заданих пропорціях з друком по трафаретам і з використанням дозаторів. Автомати для поверхневого монтажу можуть помістити навіть дрібні SMD-елементи на паяльній площинці. Нові технології дозволяють скоротити кількість помилок під час монтажу, тому завдяки

своїм перевагам сьогодні SMD-технологія є основною технологією монтажу друкованих плат.

Висновки.

Особливості та основні переваги автоматичного монтажу:

- групове паяння компонентів – прецизійні установники компонентів забезпечують швидкість встановлення до 50 тисяч компонентів на годину;
- повторюваність процесу дозволяє програмувати встановлення будь-якої складності, виставляючи різні умови в налаштуваннях;
- контроль температурного режиму у конвекційних печах гарантує чітке формування паяних з'єднань.

– час виробництва друкованого вузла зменшується завдяки використанню безвідмивної та екологічної паяльної пасти;

– суворий контроль якості за допомогою приладів оптичної інспекції та покрокового тестування.

У зв'язку з тим, що SMD-монтаж простіше автоматизувати, він застосовується на підприємствах із великосерійним виробництвом. При цьому ТНТ-монтаж, як і раніше актуальний у багатьох галузях промисловості. Тому було створено автомати змішаного типу, які можуть встановлювати як ТНТ, так і SMD-компоненти, не вимагаючи переналадження устаткування.

Список літератури:

1. Dixon D. et al. «Development of a Solder Paste Test Vehicle for Miniaturized Surface Mount Technology». IPC Apex Expo Proceedings, 2018.
2. Bixenman M. et al. «Quantifying the Improvements in the Solder Paste Printing Process from Stencil Nanocoatings and Engineered Under Wipe Solvents». International Conference on Soldering and Reliability Proceedings, 2014.
3. Agarwal N. «Evaluation of Stencil Technology for Miniaturization». SMTA International Proceedings, 2016.
4. Welch R. «SPI Data Analysis, Print Process Characterization/Optimization. Presentation». April 2019.
5. Shea C., Lawrence R. «Solder Paste Qualification Testing for EMS Production». SMTA International Proceedings, 2017.

Haryst A.V. AUTOMATION ASSEMBLY TECHNOLOGY PRINTED CIRCUIT BOARDS

Modern trends in the manufacture of electronic equipment are characterized by the desire to increase the functionality of devices and simultaneously reduce their overall parameters. As a result, you can get a large number of high-quality and inexpensive products. The article is devoted to an overview of the basics and principles of automated assembly technology, which is the optimal and most popular option for large-scale production.

The article found out that the quality of the assembled electronic module depends on compliance with the installation technology. Project documentation for automated surface mounting has certain requirements: an assembly diagram and assembly drawings indicating the height of the components, the method of formation, polarity, element keys and positional values, as well as a specification with the full name and positional designation of the components.

The article defines that the automated installation of printed circuit boards is a pre-programmed process that takes place practically without the operator's participation. Multifunctional automatic equipment is used in production. It allows you to mount more than 50,000 elements per hour on a printed circuit board, which is especially relevant for large-scale production. The terminals of the SMD components have miniature dimensions and are soldered to the points of the contact planes on the surface of the boards. Therefore, the accuracy of the installation of elements, which is achieved with the use of the latest automatic equipment, is very important.

The article reveals that the surface mounting technology is becoming the optimal method of circuit board production. If earlier in their manufacture mainly hanging components were used, today more than 90% of printed circuit board elements are SMD elements. If DIP components are fixed at special stations or manually, the process of installing SMD elements is more than 95% automated. Human labor during surface assembly is required to set up automatic equipment, load workpieces and elements onto conveyor lines.

Key words: printed circuit board, automated assembly, SMD-assembly, TNT-assembly, stencil.

ПРИЛАДИ

УДК 006.065

DOI <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2024.5.1/05>**Прокопченко С.В.**Український науково-дослідний інститут спеціальної техніки та судових експертиз
Служби безпеки України

ПРАКТИЧНА ОЦІНКА МІЖКАЛІБРУВАЛЬНОГО ІНТЕРВАЛУ ВИПРОБУВАЛЬНОГО ОБЛАДНАННЯ

Стаття присвячена розгляду міжкалібрувального інтервалу – максимального терміну, який може бути дозволений між послідовними калібруваннями випробувального обладнання, як першочергового елемента в системі ризик-менеджменту, що використовує випробувальна лабораторія в своїй діяльності відповідно до вимог ДСТУ 17025. З цією метою для оптимізації балансу ризиків та витрат під час проведення калібрування випробувального обладнання на постійній основі переглядають (коригують) тривалість міжкалібрувального інтервалу. Особливим аспектом є те, що калібрування випробувального обладнання необхідне для встановлення метрологічної простежуваності отриманих результатів, а засоби вимірювальної техніки необхідно калібрувати з метою оцінки цього впливу на результат.

На теперішній час наявна велика кількість настанов, які допомагають випробувальній лабораторії визначити міжкалібрувальний інтервал для кожного засобу вимірювальної техніки. Значно менше уваги приділено саме випробувальному обладнанню.

Автором в статті запропоновано методичні рекомендації з практичного досвіду щодо встановлення та коригування міжкалібрувальних інтервалів випробувальних кліматичних камер тепла та холоду, що використовують під час проведення випробувань продукції приладобудування на відповідність вимогам державних (національних) та міжнародних стандартів. Розглянуто застосування методу «сходинок» як найбільш практичного в діяльності випробувальної лабораторії, оскільки випробувальна лабораторія використовує зазвичай один екземпляр кожного типу або виду випробувального обладнання, іноді – два-три екземпляри, при відсутності загальної інформації щодо результатів використання цього типу устаткування.

Ключові слова: загальні вимоги, калібрування, настанови щодо визначення, міжкалібрувальний інтервал, випробувальне обладнання.

Постановка проблеми. Акредитовані випробувальні лабораторії (ВЛ) в Україні вже значний час використовують в своїй практичній діяльності термін та функцію «калібрування».

У Міжнародному словнику основних і загальних термінів у метрології (VIM 3) [1] надано таке визначення калібрування:

«2.39 калібрування – сукупність операцій, за допомогою яких за заданих умов на першому етапі встановлюється співвідношення між значеннями величини, що забезпечуються еталонами з притаманними їм невизначеностями вимірювань, та відповідними показами з пов'язаними з ними невизначеностями вимірювань, а на другому етапі ця інформація використовується для встановлення співвідношення для отримання результату вимірювань з показу».

Ступінь обов'язковості калібрування регламентовано п. 6.4.6 ДСТУ ISO/IEC 17025:2019 [2]

(далі – ДСТУ 17025) та відповідно до політики ІЛАС з простежуваності результатів вимірювань [3] залежить від внеску невизначеності калібрування у загальну невизначеність випробування. Якщо калібрування випробувального обладнання (далі – ВО) необхідне для встановлення метрологічної простежуваності отриманих результатів, то засоби вимірювальної техніки (далі – ЗВТ) необхідно калібрувати з метою оцінки цього впливу.

Зазвичай ВЛ повинна мати програму калібрування, яка переглядається та при необхідності коригується для підтримання довіри (впевненості) до статусу калібрування. Програма калібрування являється засобом встановлення та підтримки метрологічної простежуваності результатів вимірювань за допомогою задокументованого нерозривного ланцюга калібрувань, кожне з яких дає свій внесок у невизначеність вимірювання, пов'язуючи їх з відповідним еталоном [2].

Аналогічні вимоги наведено у п. 7.1.5.2 ISO 9001 [4], де зазначено, що якщо організація вважає простежуваність вимірювань суттєвим елементом гарантування впевненості у достовірності результатів вимірювань, то вимірювальне устаткування потрібно калібрувати та/чи перевіряти з установленою періодичністю або перед використанням, із застосуванням еталонів з наявними доказами простежуваності останніх.

Відповідно до п. 7.1.2 ДСТУ ISO 10012 [5], методи, що використовують для визначення чи зміни періодичності метрологічного підтвердження, потрібно описати з аналізом в задокументованих методиках. Одночасно з тим в ДСТУ ІЛАС-G 24/OIML D 10 [6] наведено лише загальний опис вимог до визначення можливих методів встановлення міжкалібрувальних інтервалів (далі – МКІ) та їх коригування.

На підставі зазначених нормативних документів та практичного досвіду діяльності ВЛ здійснено обґрунтування оцінки встановлення МКІ ВО, а саме – кліматичних камер тепла та холоду типу Tabai MC-71.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Шляхи і методи перегляду та коригування МКІ вивчали українські дослідники І. Потоцький [7]; В.Єременко, В. Мокійчук, О. Редько, О. Рамазанова-Стьопкіна [8], О. Волков, Р. Волков, К. Колобов, О. Лесик, С. Ричок [9]; І. Захаров, О. Новосолов [10].

Зазвичай всі вони, в основному, розглядають питання пов'язані з МКІ ЗВТ, але завдання визначення та встановлення МКІ ВО заслуговує окремої уваги.

Постановка завдання. Метою статті є обґрунтування коригування МКІ камер випробувальних тепла та холоду типу Tabai MC-71, що використовуються ВЛ під час проведення випробувань продукції приладобудування, оскільки саме вплив підвищеної та зниженої температури є одним з основних чинників, що визначають нестабільність і деградацію параметрів будь-якого виробу.

Виклад основного матеріалу. ВЛ в своїй діяльності відповідно до вимог ДСТУ 17025 повинна сформулювати систему ризик-менеджменту та застосовувати процес керування ризиками, що впершу чергу стосується ризиків пов'язаних з ВО.

При експлуатації ВО необхідно виконувати *технічне обслуговування, зорієнтоване на забезпечення безвідмовності – метод функційного аналізування*, який дає змогу ідентифікувати політики, які треба запровадити для керування відмовами, щоб ефективно та результативно

досягати необхідного рівня безпеки, готовності та економічності функціонування всіх типів устаткування [11].

Визначення МКІ – максимального терміну, який може бути дозволений між послідовними калібруваннями ВО, є важливим питанням в діяльності ВЛ. Для оптимізації балансу ризиків та витрат під час проведення калібрування ВО на постійній основі може бути здійснений перегляд МКІ, що впливає на його тривалість.

В процесі коригування МКІ необхідно обов'язково враховувати чинники зазначені в [6, 10], а саме:

- 1) заявлена ВЛ невизначеність вимірювання;
 - 2) ризик перевищити межі максимально допустимої похибки ВО під час його експлуатування;
 - 3) вартості коригування результатів вимірювання при виявленні невідповідності (впродовж певного часу) обладнання встановленим вимогам;
 - 4) тип ВО та рік його виготовлення;
 - 5) тенденції до зносу та дрейфу;
 - 6) настанови з експлуатації (рекомендації) виробника ВО;
 - 7) умови експлуатації та параметри довкілля (наявні кліматичні умови, механічні чинники, тощо);
 - 8) дані щодо тенденцій (як негативних, так і позитивних) визначених з попередніх звітів про калібрування;
 - 9) зареєстрована історія зберігання та технічного обслуговування ВО;
 - 10) частота порівняння з іншими еталонами або аналогічним ВО;
 - 11) частота та якість проміжного перевіряння між калібруваннями;
 - 12) вимоги транспортування та ризику при транспортуванні;
 - 13) кваліфікація персоналу, що обслуговує ВО.
- Перегляд МКІ рекомендовано виконувати, якщо спочатку встановлені МКІ не дають бажаних оптимальних результатів у зв'язку з такими причинами, як наприклад:
- 1) ВО в процесі експлуатації може виявитись менш надійним, ніж очікувалось;
 - 2) застосування ВО може бути іншим, ніж передбачалось;
 - 3) проведення обмеженого калібрування деяких складових частин обладнання виявилось достатнім та доцільним, порівняно із проведенням повного калібрування;
 - 4) дрейф, визначений при повторному калібруванні ВО може показати, що МКІ можуть бути змінені без збільшення ризиків, тощо.

Початкове рішення щодо оцінювання та визначення МКІ може спиратись на такі аргументи:

1) МКІ, що встановлені та рекомендовані метрологічними центрами під час надання послуг з проведення повірки ВО;

2) рекомендації виробників ВО.

Після визначення первинних МКІ можливе виконання їх коригування для оптимізації співвідношення ризиків і витрат ВЛ. Окремі рекомендації щодо оцінювання МКІ ВО розглянуті в наступних нормативних документах [13] – [18].

Відомий український вчений І.П. Захаров запропонував основні методи коригування МКІ [19], які наведено в таблиці 1.

В практичній діяльності для обґрунтування встановлення оптимального інтервалу часу між послідовними калібруваннями певних засобів ВО, що використовується ВЛ для кліматичних випробувань продукції приладобудування, частіше використовують метод «сходинки».

Зазначений метод найбільш враховує реалії діяльності ВЛ, оскільки ВЛ використовує зазвичай один екземпляр кожного типу і виду ВО, іноді – два-три екземпляри при відсутності

загальної інформації щодо результатів використання цього типу ВО. Тому оцінка МКІ базувалась на використаних в практичній діяльності міркуваннях здорового глузду автора, з огляду на власний досвід, використання статистичного обліку в часі змін точності результатів вимірювань, низької інтенсивності використання ВО протягом року (близько 1000 годин за рік) та відсутності відмов ВО.

Наведемо наявну інформацію по ВЛ для проведення оцінювання МКІ:

а) метрологічна простежуваність ВЛ гарантовано тим, що:

– визначено величину, що підлягає вимірюванню – температура;

– задокументовано неперервний ланцюг калібрувань протягом 3-х років;

– під час калібрування кожен рік оцінювалась невизначеність встановлення (вимірювання) температури випробувальних камер тепла та холоду відповідно до стандартизованих верифікованих методів калібрування, що задовольняють ВЛ;

– компетентність калібрувальної лабораторії ДП «Укрметрестандарт» згідно з вимогами

Таблиця 1

Основні методи коригування МКІ

№ з/п	Назва методу коригування МКІ	Переваги методу коригування МКІ	Недоліки методу коригування МКІ	Примітки
1	Автоматичне регулювання або «сходинка» (календарний строк служби) Метод 1.	Дозволяє виконувати оперативне регулювання МКІ	Важко підтримувати об'єм робіт по МКІ збалансованим та однорідним	
2	Контрольна карта (календарний строк служби). Метод 2.	Може бути отриманий оптимальний ефективний каліброчний інтервал	Важко застосовувати при наявності комплексу ЗВТ або ВО. Практично може бути використаний лише при автоматизованому обробітку даних	
3	«Використання» часу. Метод 3.	Кількість калібрувань та вартість калібрування залежить від терміну часу використання ЗВТ або ВО	Відсутня можливість виконати з пасивними ЗВТ (наприклад, атенюаторами) або еталонами (опір, ємність). Неможливо виконати, якщо ЗВТ (або ВО) дрейфують або вони знаходяться на зберіганні	Це варіація методів 1 та 2
4	Сервісна перевірка, або тестування методом «чорного ящика». Метод 4.	Максимальна доступність для користувача. Особливо рекомендований для складних ЗВТ або випробувальних консолей	Важко прийняти рішення щодо визначення критичних параметрів та проектування «чорного ящика»	Це варіація методів 1 та 2. Рекомендований для ЗВТ та ВО географічно віддалених від калібрувальної лабораторії
5	Інші статистичні підходи . Метод 5.	З успіхом застосовуються для калібрування великої кількості однакових ЗВТ або ВО (тобто групи)	Необхідна наявність адекватного програмного забезпечення	

Примітка. Пояснення кожного методу надано в [13, 18].

ДСТУ 17025 підтверджено атестатом акредитації Національного агентства з акредитації України;

б) згідно з рекомендаціями [14] здійснено первинне калібрування ВО до введення його в експлуатацію в складі всього обладнання ВЛ та проведена його верифікація з встановленням інтервалу калібрування 12 місяців як для ВО;

в) у ВЛ застосовано правило прийняття рішення за «методом точності» [19]. Тобто використовують метод оцінки з відомими показниками точності, а джерела невизначеностей зведено до мінімуму шляхом:

- використанням ЗВТ з максимально допустимими похибками, які містяться в певних межах;
- впливом на ВО навколишнього середовища, такі як температура та відносна вологість, що підтримуються у заданих межах;
- підтвердженням контролюванням лабораторних методик вимірювання;
- підтверженою компетентністю персоналу, який проводить вимірювання;

г) Замовник, зазвичай, в технічній документації на продукцію наводить допуск встановлення температури в камері в межах $\pm 1^{\circ}\text{C}$;

д) відповідно до політики ІЛАС [3] з метою простежуваності результатів вимірювань все обладнання, що використовується для калібрувань, включаючи допоміжне обладнання (наприклад, для оцінки умов довкілля) та має вплив на точність або валідність результатів, повинно обов'язково бути відкаліброване;

е) рішення про те, які інтервали часу необхідно встановити між послідовними калібруваннями ВО, що використовуються у ВЛ, цілком полягає в компетенції керівництва ВЛ.

Об'єкт оцінювання: канал встановлення та вимірювання температури камер випробувальних тепла та холоду Tabai MC-71 (2 одиниці). Базисом для оцінювання є статистичні дані із сертифікатів про калібрування за 2021–2023 роки наведені в таблиці 2.

Крім каналу встановлення та вимірювання температури камер випробувальних тепла та холоду Tabai MC-71 ВЛ при випробуваннях застосовує 2 додаткових шляхи контролю температури з використанням скляних кутових термометрів типу Labortherm-N та термогігрометра цифрового EZODO HT-380. Тобто, ризик щодо отримання

Таблиця 2

Інформація за результатами калібрувань

Задана температура, $^{\circ}\text{C}$	Середнє значення показів еталону, $^{\circ}\text{C}$	Різниця, $^{\circ}\text{C}$	Розширена невизначеність, $^{\circ}\text{C}$	Максимальна похибка за технічною документацією на ВО, $^{\circ}\text{C}$	Максимальне відхилення від максимальної похибки, %
<i>Tabai MC-71, № 1 Калібрування в 2021 році</i>					
-20,00	-20,50	0,50	0,74	+/-1	37,0
0,00	0,30	-0,30	0,52	+/-1	26,0
40,00	40,70	-0,80	1,03	+/-1	51,5
<i>Tabai MC-71, № 1 Калібрування в 2022 році</i>					
-20,00	-20,40	0,40	0,53	+/-1	26,5
0,00	-0,40	0,40	0,64	+/-1	32,0
50,00	50,70	-0,70	0,91	+/-1	45,5
<i>Tabai MC-71, № 1 Калібрування в 2023 році</i>					
-20,00	-20,30	0,30	0,51	+/-1	25,5
0,00	-0,40	0,40	0,68	+/-1	34,0
50,00	49,60	0,40	0,69	+/-1	34,5
<i>Tabai MC-71, № 2 Калібрування в 2021 році</i>					
-20,00	-20,50	0,50	0,68	+/-1	34,0
0,00	0,40	-0,40	0,64	+/-1	32,0
50,00	50,60	-0,60	0,86	+/-1	43,0
<i>Tabai MC-71, № 2 Калібрування в 2022 році</i>					
-20,00	-20,60	0,60	0,79	+/-1	39,5
0,00	0,40	-0,40	0,67	+/-1	33,5
50,00	50,70	-0,70	0,92	+/-1	46,0
<i>Tabai MC-71, № 2 Калібрування в 2023 році</i>					
-20,00	-19,96	-0,04	0,78	+/-1	2,0
0,00	-0,62	0,62	0,79	+/-1	31,0
50,00	49,02	0,98	0,79	+/-1	49,0

Результат розрахунку МКІ ВО

Тип ВО та роки калібрування	Максимальна допустима похибка (по модулю)	Максимальна допустима похибка згідно з результатами калібрування (по модулю)	Відсоткове відношення максимальної похибки згідно з результатами калібрування до максимальної допустимої похибки (по модулю)	Висновок (X<80% або X=80% або X> 80%)	Початковий МКІ	Розрахований МКІ
Tabai MC-71, № 1 (2021-2023)	2°C	0,8°C	$100\% \times 0,8/2 = 40\%$	Збільшити на 50% (< 80%)	12 місяців	18 місяців
Tabai MC-71, № 2 (2021-2023)	2°C	0,7°C	$100\% \times 0,7/2 = 35\%$	Збільшити на 50% (< 80%)	12 місяців	18 місяців
Tabai MC-71, № 1 (2021-2023)	2°C	0,7°C	$100\% \times 0,7/2 = 35\%$	Збільшити на 50% (< 80%)	12 місяців	18 місяців
Tabai MC-71, № 2 (2021-2023)	2°C	0,98°C	$100\% \times 0,98/2 = 49\%$	Збільшити на 50% (< 80%)	12 місяців	18 місяців

недостовірних результатів вимірювань як наслідок виникнення раптової несправності каналу встановлення та вимірювання температури камер випробувальних тепла та холоду типу «Tabai» MC-71, а також з врахуванням правила прийняття рішення у ВЛ щодо вимірювання температури – мінімальний.

Для камер випробувальних тепла та холоду Tabai MC-71, (канал встановлення та вимірювання температури) максимальна похибка за технічною (експлуатаційною) документацією не перевищує $\pm 1,00^\circ\text{C}$ (допуск).

За результатом оцінювання можливості коригування МКІ камер випробувальних тепла та холоду «Tabai» MC-71 (канал встановлення та вимірювання температури) визначено доцільність застосування автоматичного коригування інтервалу калібрування (використання методу «сходинки» для календарного часу). Кожного разу коли ВО калібрують звичайним чином, наступний інтервал збільшують (розширюють), якщо виявляють, що покази каналу встановлення та вимірювання температури камер випробувальних тепла та холоду типу «Tabai» MC-71 знаходяться у межах 80% від максимально допустимої похибки, або зменшують, якщо визначено, що похибка виходить за межі максимально допустимої похибки.

Для прийняття обґрунтованого рішення застосовують критерій:

$X < 80\%$ – МКІ збільшують на 50% (6 місяців) у порівнянні з початковим значення;

$X = 80\%$ – МКІ не змінюють;

$X > 80\%$ – МКІ зменшують на 50% (6 місяців) у порівнянні з початковим значення.

В наведеному прикладі всі значення максимального відхилення від максимальної похибки знаходяться в межах (24,0–60,0)%.

Результат розрахунку МКІ камер випробувальних тепла та холоду Tabai MC-71 за 3 роки, з мінімізацією можливого ризику щодо отримання недостовірних результатів вимірювань, наведено в таблиці 3.

Висновки. Наявність звітів із результатами розрахунку та обґрунтуванням МКІ є документальним підтвердженням ведення ВЛ належного контролю за метрологічним статусом кожної одиниці ВО. Запропоновані методичні рекомендації коригування МКІ призначені для тих спеціалістів, хто займається метрологічним забезпеченням ВО в рамках сфери акредитації ВЛ, проте не має достатньої наукової бази в області математичної статистики, але вимушений у стислі строки приймати рішення стосовно ефективності користування та коригування МКІ. На думку автора, представлені в статті рекомендації дозволяють ефективно використовувати ресурси на метрологічне забезпечення та полегшити співпрацю між лабораторіями щодо обміну інформацією і досвідом.

Список літератури:

1. Міжнародний словник основних і загальних термінів в метрології. – <http://www.oiml.org/publications/V/V002-200-e10.pdf>.

2. Загальні вимоги до компетентності випробувальних та калібрувальних лабораторій ДСТУ ISO/IEC 17025:2019 (EN ISO/IEC 17025:2017, IDT; ISO/IEC 17025:2017, IDT). – [Чинний з 2019-12-23]. – К.: ДП «УкрНДНЦ», 2020. – 23 с. – (Національний стандарт України).

3. ILAC Policy on the Traceability of Measurement Results: ILAC P10:01/2013. – 10 p. – <http://ilac.org/publications-and-resources/ilac-policy-series>
4. Системи управління якістю. Вимоги (ISO 9001:2015, IDT): ДСТУ ISO 9001:2015. – [Чинний з 2016-07-01]. – К.: ДП «УкрНДНЦ», 2016. – 31 с. – (Національний стандарт України).
5. Системи керування вимірюваннями. Вимоги до процесів вимірювання та вимірювального обладнання (ISO 10012:2003, IDT): ДСТУ ISO 10012:2005. – [Чинний з 2007-01-01]. – К.: Держспоживстандарт України, 2007. – 25 с. – (Національний стандарт України).
6. Метрологія. Наставни щодо визначення міжкалібрувальних інтервалів засобів вимірювальної техніки (ILAC-G24/OIML D10:2007, IDT): ДСТУ ILAC-G24/OIML D10:2013. – [Чинний з 2014-07-01]. – К.: Мінекономрозвитку України, 2014. – 6 с. – (Національний стандарт України)/
7. І.О. Потоцький «Методи встановлення інтервалів калібрування еталонів та засобів вимірювальної техніки»: дис. Київ, 2020. – 147 С.
8. В.С. Єременко, В.М. Мокійчук, О.А. Рамазанова-Стьопкіна, О.О. Редько Національні особливості калібрування, с. 12-18, Український метрологічний журнал. 2017, № 4.
9. О.Ф. Волков, Р.О. Волков, К.С. Колобов, О.С. Лесик, С.О. Ричок Розрахунок міжкалібрувальних інтервалів засобів вимірювальної техніки, с. 11-13, Автомобільний транспорт, № 5 (247), жовтень 2015 року.
10. І.П. Захаров, О.А. Новосолов. Визначення калібрувальних та вимірювальних можливостей калібрувальної лабораторії в процесі її акредитації, с. 3-11, Український метрологічний журнал. 2017, № 4.
11. Н.В. Топчій Аналіз ризиків у випробувальній лабораторії органу оцінки відповідності. Вчені записки Таврійського національного університету імені В.І. Вернадського. Серія «Технічні науки» Том 31 (70). № 6, 2020, С. 1-5.
12. ДСТУ 6044:2008 «Метрологія. Міжповірочний інтервал засобів вимірювальної техніки. Основні положення і вимоги до установаження».
13. Метрологія. Методи визначення міжповірочного та міжкалібрувального інтервалів засобів вимірювання (РМГ 74–2004, IDT): ДСТУ-Н РМГ 74:2009. –[Чинний з 2010-04-01]. – К.: Держспоживстандарт України.
14. МЕК CTL-OP 111 Ed. 2.0, 2011, «Вимоги до простежуваності калібрувань та до інтервалів калібрування».
15. GMP 11 Рекомендації Національної Конференції Еталонних Лабораторій, (NCSL) США.
16. ДСТУ ISO 31000:2018 (ISO 31000:2018, IDT) ISO 31000:2018 IDT Менеджмент ризиків. Принципи та настанови.
17. ДСТУ ISO/TR 31004:2018 (ISO/TR 31004:2013, IDT) ISO/TR 31004:2013 IDT Менеджмент ризиків. Наставова з впровадження ISO 31000;
18. І.П. Захаров «Калібрування-17025», Довідковий посібник, видання 4, Харків, 2018, 87 с.
19. International Electrotechnical Commission. IEC Guide 115 Application of uncertainty of measurement to conformity assessment activities in the electrotechnical sector. 2007. Edition 1.0.
20. МКУ 105-24/03-2015 «Метрологія. Випробувальне та лабораторне термообладнання. Методика калібрування»

Prokopchenko S.V. PRACTICAL EVALUATION OF THE INTERCALIBRATION INTERVAL OF THE TEST EQUIPMENT

The article is devoted to the At present, there are a large number of guidance documents that help the testing laboratory to determine the inter-calibration interval for each measuring instrument. To ensure confidence in the reliability of the measurement results, they propose to calibrate and/or check the measuring equipment (test equipment) at set intervals or to use standards with available evidence of traceability of the latter before use.

The revision of the calibration intervals of the test equipment is carried out on the basis of continuous calibration in order to optimize the balance of risks and costs, which affects its duration.

The authors, on the example of test climatic chambers of heat and cold, conduct tests of instrumentation products for compliance with national and international standards, offer methodological recommendations for the establishment and adjustment of inter-calibration intervals. The list of current normative documents is considered and the conditions for changing the inter-calibration interval are determined. Since the test laboratory usually uses one copy of each type and type of test equipment, very rarely – two or three copies, without access to the results of the type test, the method of "steps" (calendar time) is used. Each time the instrument is calibrated normally, the next interval increases (expands) if it is found that the instrument is within 80% of the maximum permissible error or decreases if it is determined that the error is outside the maximum permissible error (results are shown in Table 2).

The proposed guidelines for adjusting the intercalibration intervals are intended for those who are engaged in metrological support of test equipment in the field of accreditation of testing laboratories, but do not have a sufficient scientific basis in mathematical statistics, but have to understand the effectiveness of the intercalibration interval.

Key words: *general requirements, calibration, guidelines for the determination, interval adjustment, testing equipment.*

РАДІОТЕХНІКА ТА ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЇ

УДК 616.2

DOI <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2024.5.1/06>**Загребя А.Я.**Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»**Лебедев Д.Ю.**Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

РЕАЛІЗАЦІЯ ПРОГРАМНОГО ЗАСТОСУНКУ ДЛЯ ОЦІНКИ АУДІТИВНОГО СПРИЙНЯТТЯ У КОРИСТУВАЧІВ

Темою цього дослідження є розробка програмного скрипта для оцінки аудітивного сприйняття у користувачів. В сучасному інформаційному суспільстві, де технології вплетені у всі аспекти нашого життя, здатність взаємодіяти з різноманітними аудіовісними вмістами має велике значення. Дослідження аудітивного сприйняття користувачів є актуальним завданням, оскільки воно може відкрити шлях до подальших покращень в розробці методик покращення аудітивного сприйняття.

Задача оцінки аудітивного сприйняття користувачів вимагає високоточних методик та ефективних інструментів. У цьому дослідженні буде розглянуто розробку програмного скрипта, який дозволяє систематично вивчати та аналізувати рівень аудітивного сприйняття в різних умовах. Використання такого скрипта може надати важливі дані для розуміння і покращення сприйняття звукової інформації користувачами.

Для поліпшення точності та надійності дослідження вводяться алгоритми, які адаптують параметри звуку до індивідуальних особливостей користувача. Ці алгоритми враховують реакцію користувача та оптимізують процес тестування.

Підхід до створення програмного скрипта не лише створює умови для детального аналізу аудітивного сприйняття, але також відкриває шлях до подальших досліджень та розвитку в області аудіоінтерфейсів. В цій статті буде представлено основні принципи роботи такого скрипта, а також обговорено можливості його застосування та перспективи для майбутніх досліджень.

Загальні результати дослідження можуть бути корисні для розуміння впливу різних факторів на якість слуху та розвитку методик для діагностики захворювань слуху. За результатами даного дослідження може бути розроблено онлайн сервіс для самостійного аналізу стану слуху – що дасть можливість виявити проблеми на ранній стадії, або відслідковувати змінення стану слуху користувача.

Ключові слова: аудітивне сприйняття, технологічні інструменти, розробка інтерфейсів, взаємодія зі звуковим середовищем, інтерактивні дослідження, аудіотехнології, аудіосприйняття.

Постановка проблеми. Постійне навантаження на слух є важливою складовою сучасного життя, і внаслідок цього багато людей стикаються з суттєвим погіршенням їхнього слухового здоров'я. Розповсюдженість аудіотехнологій та високий рівень шумового забруднення можуть впливати на чутливість слуху та сприяти розвитку аудіальних проблем.

Завдяки постійній зайнятості та швидкому ритму сучасного життя, люди часто відкладають візит до лікаря для перевірки свого слуху. Нестача

часу стає значущою перешкодою для вчасної діагностики та вирішення можливих аудіальних проблем. Внаслідок цього виникає потреба в доступних та зручних методах самостійної перевірки слуху без візиту до медичного закладу.

Відсутність можливості швидко перевірити слух в домашніх умовах стає важливим аспектом в умовах сучасного ритму життя. Розробка ефективних та простих у використанні засобів для домашньої аудіометрії може сприяти збереженню та відновленню слухової функції у людей.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Тональна порогова аудіограма – графічне зображення порогів (рівнів) чутності тонів в децибелах у функції частоти стимулюючого тону, отриманих за допомогою діагностичного приладу – аудіометр.

Аудіограми є важливим методом аналізу слуху, який зазвичай використовується в лікарнях для діагностики стану аудітивного сприйняття, і має назву – тональна порогова аудіометрія. Ці графічні представлення результатів аудіометричного обстеження дозволяють фахівцям оцінити чутливість пацієнта до різних частот, відображаючи порогові чутності тонів в децибелах відповідно до частот стимулюючого тону, і виявити можливі порушення слуху [1, 2].

Однак у даній статті розглядається інноваційний підхід до аналізу слуху за допомогою спеціально розробленого скрипта, який може бути використаний в домашніх умовах. Скрипт дозволяє виконувати самостійні перевірки слуху, допомагаючи користувачам завчасно виявляти відхилення від норми [3]. Такий підхід сприяє ранній діагностиці та може слугувати основою для звернення до фахівця у випадках виявлених відмінностей в аудіотестуванні.

Загалом, об'єднання традиційного методу аудіограм та інноваційного скрипта для домашнього аудіотестування створює можливості для більш широкого контролю над станом слуху. Це може виявитися важливим елементом у підтримці аудітивного здоров'я та своєчасному виявленні можливих проблем.

Постановка завдання. Із зростанням обтяжливості аудіальних подразників у повсякденному житті і поширенням факторів, що негативно впливають на слух, зростає необхідність в створенні доступних користувачам-непрофесіоналам засобів для аналізу стану їхнього слуху. Відповідаючи на цей виклик, важливо розробити скрипт, що дозволить звичайним людям, які не є програмістами чи лікарями, самостійно проводити аналіз слуху.

Цей скрипт повинен бути максимально простим та інтуїтивно зрозумілим для кінцевого користувача. Його основна функція полягає в проведенні аудіометрії та виявленні відхилень від норми. Додатково, для зручності користувача, результати аналізу повинні надаватися в зрозумілому форматі та повідомляти про будь-які потенційні проблеми зі слухом.

Створення такого скрипта може сприяти ранньому виявленню аудіальних проблем та допомагати користувачам у збереженні свого слухового здоров'я. Враховуючи різноманітність та доступ-

ність аудіотехнологій, створення інструменту, який може бути використаний без спеціалізованих навичок, є кроком у напрямку підтримки глобального здоров'я слуху населення.

Виклад основного матеріалу. Методика дослідження чутливості слуху базується на використанні скрипта, який генерує звук певної частоти та гучності та фіксує реакцію користувача. Скрипт запускається на комп'ютері з підключеними навушниками. Користувачу пропонується слухати звук та натискати клавішу “а”, якщо він його чує. Якщо протягом певного часу (2 секунди) користувач не натиснув клавішу “а”, гучність звуку збільшується на один крок (1%). Якщо гучність дійде до максимальної (100%), частота звуку збільшиться на один крок (наприклад, на 100 герц), а користувачу буде виведено повідомлення, що він не почув попередню частоту. Якщо ж користувач в певний момент натисне кнопку “а”, скрипт збереже поточну частоту та гучність та повторить цикл для наступної частоти. Коли цикл дійде до максимальної частоти (20 кілогерц), він обробить отримані дані та збереже їх в файл, і користувач вже буде мати можливість подивитися на результати.

Метою цього дослідження є визначення рівня чутливості слуху користувачів, що може бути корисним для діагностики різних захворювань слуху, а також для оцінки впливу різних факторів, таких як шум, музика, навантаження, тощо, на якість сприйняття звуку. Дослідження проводиться у зручних для користувача умовах, без необхідності відвідувати лікарню або лабораторію. Дослідження не вимагає від користувача спеціальних навичок або знань, а лише здатності чути звук та натискати клавішу.

Для збільшення точності та надійності дослідження введено декілька алгоритмів, які адаптують параметри звуку до індивідуальних особливостей користувача. Алгоритми такі:

а. Якщо користувач почув звук після 10-го підвищення гучності, буде збільшено початкову гучність тестування, для уникнення довгих перевірок на гучності, яку користувач не чує. Це дозволить скоротити час тестування та зменшити нудоту користувача від постійного слухання тихого звуку.

б. Якщо користувач почує звук на мінімальній гучності, вона буде поступово зменшуватися, так, щоб користувач не чув на мінімальній гучності, але приблизно через 5–10 кроків підвищення гучності, він чув. Це дозволить визначити мінімальну гучність, при якій користувач чує звук, що є важливим показником якості слуху.

с. Якщо користувач не почує звук після 15 кроків підвищення гучності, швидкість наростання

гучності збільшується. Це допоможе прискорити процес тестування.

Результати дослідження представлені у вигляді таблиці та графіка, які показують залежність чутливості слуху від частоти звуку для кожного користувача. Таблиця містить такі дані: частота звуку, гучність звуку, яку почув користувач. Графік має дві осі: по осі X – частота звуку, по осі Y – гучність звуку. Графік демонструє, які частоти звуку були почуті користувачем при різних рівнях гучності.

Варіанти для подальшого вдосконалення скрипта та дослідження полягають у наступному:

Збільшити кількість користувачів, які беруть участь у дослідженні, для отримання більш репрезентативної вибірки.

Зменшити кроки зміни гучності та частоти звуку, для отримання більш точних даних про чутливість слуху.

Врахувати додаткові фактори, які можуть впливати на чутливість слуху, такі як вік, стать, професія, захворювання тощо.

Використовувати різні типи звуків, не лише синусоїдальні, але й інші, наприклад, білий шум, музика, мова тощо.

Вбудувати скрипт на веб-сторінку так, щоб будь-хто міг протестувати слух без встановлення додаткових засобів.

Показувати користувачу не тільки його дані, а й анонімізовані дані інших користувачів.

Дані користувачів можна розбити на групи, наприклад, за віком, щоб користувачі могли оцінити свій стан в порівнянні з іншими.

Додати дані, які спеціалісти вважають ідеальними, і крім їх відображення, якщо дані користувача значно відрізняються, пропонувати відвідати лікаря.

Алгоритм роботи скрипта. В даному розділі описано алгоритм роботи скрипта. Блок схему скрипта наведено на рисунку 1. Даний скрипт є основою для розробки програми для тестування аудітивного сприйняття і може доповнюватися, або модифікуватися для підвищення точності тестування або зручності користувача.

1. Ініціалізація:

– Скрипт оголошує та ініціалізує всі необхідні змінні, такі як:

- Початкова частота та гучність звуку.
- Кроки зміни частоти та гучності.
- Максимальна частота та гучність.
- Час очікування відповіді користувача.

2. Генерація звуку:

– Скрипт генерує звук з заданою частотою та гучністю.

– Цей процес може бути реалізований різними способами, наприклад, за допомогою генератора звукових сигналів або програмного забезпечення для обробки звуку.

3. Очікування відповіді:

– Скрипт очікує протягом заданого часу (наприклад, 1 секунди), щоб користувач відреагував на звук.

4. Аналіз відповіді:

– Якщо користувач протягом заданого часу натиснув клавішу «а», це означає, що він почув звук.

– Скрипт записує поточну частоту та гучність звуку.

– Скрипт, якщо це була максимальна частота переходить до кроку 8.

– Скрипт збільшує частоту звуку на один крок, а гучність виставляє на мінімум.

– Скрипт переходить до кроку 2.

– Якщо користувач протягом заданого часу не натиснув клавішу «а», це означає, що він не почув звук.

– Скрипт збільшує гучність звуку на один крок.

– Якщо гучність звуку досягла максимального значення, скрипт збільшує частоту звуку на один крок.

– Скрипт переходить до кроку 2.

5. Адаптація параметрів:

– Скрипт може використовувати алгоритми для адаптації параметрів звуку до індивідуальних особливостей користувача та пришвидшення проходження тесту:

– Якщо користувач не почув звук після 10 кроків підвищення гучності, початкова гучність тестування буде збільшена.

– Якщо користувач почує звук на мінімальній гучності, вона буде поступово зменшуватися.

– Якщо користувач не почує звук після 15 кроків підвищення гучності, швидкість наростання гучності буде збільшена.

6. Повторення циклу:

– Скрипт повторює цикли 2–5 для всіх частот звуку в заданому діапазоні.

7. Збереження результатів:

– Після завершення тестування скрипт записує результати в файл.

– Результати можуть бути представлені у вигляді таблиці та графіка, які показують залежність чутливості слуху від частоти звуку.

8. Відображення результатів:

– Скрипт може показувати користувачу його результати у вигляді таблиці та графіка та усереднені дані інших користувачів для порівняння.

– Скрипт може давати рекомендації користувачам, наприклад, рекомендувати відвідати лікаря, якщо його дані значно відрізняються від норми.

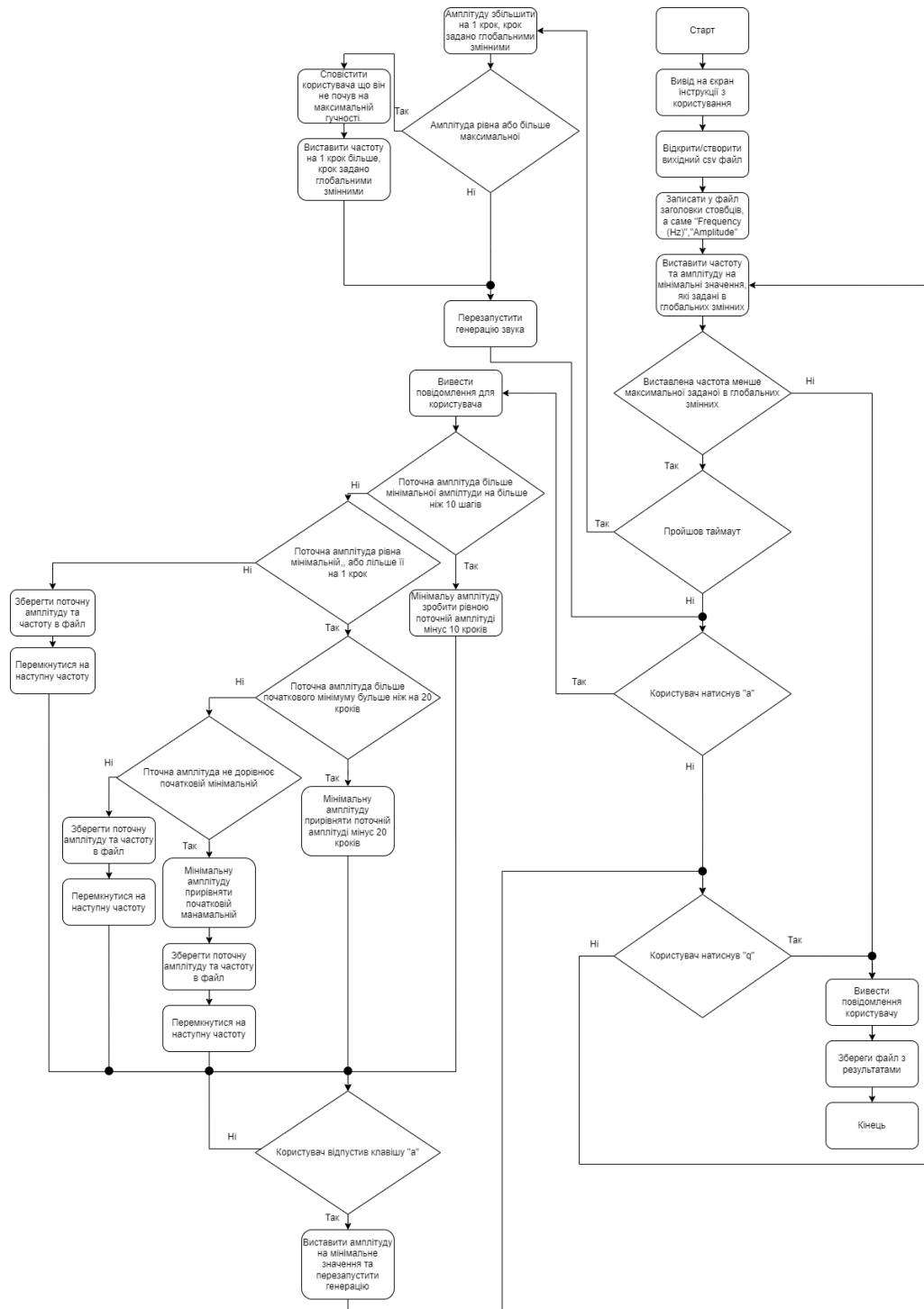


Рис. 1. Блок-схема скрипта

Результати тесту скрипта. На рисунку 2 представлено результати тестування слуху автора, де видно, що автор виявляє кращу чутливість до низькочастотних звуків, тоді як реакція на високочастотні звуки є меншою. Це може свідчити про індивідуальні особливості слухової сприйнятливості.

З метою підвищення точності тестування рекомендується зменшити крок частоти. Це призведе до

підвищення точності в діапазоні частот, на яких проводиться тест і відповідно, до зменшення можливих похибок. Рисунок 3 демонструє результати тестування зі зменшеним кроком частоти, але з одночасним збільшенням кроку гучності для оптимізації часу проведення тесту. Збільшення кроку гучності може бути корисним для ефективного використання часу, зменшуючи загальний час тривалості експерименту.

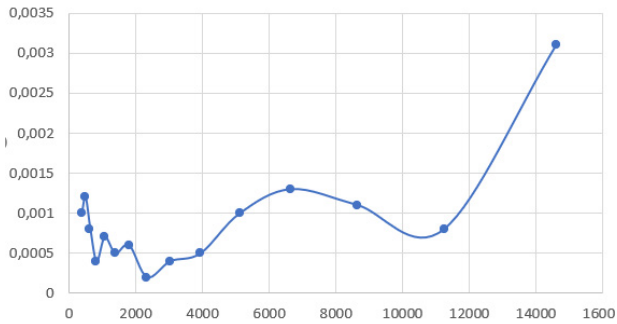


Рис. 2. Результат тестування слуху автора

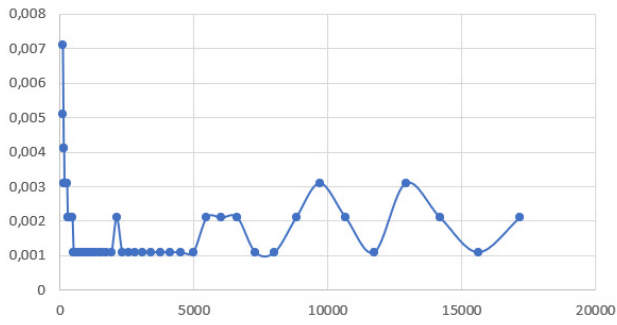


Рис. 3. Результат тестування слуху автора

На рисунку 4 відображено результат тестування зі зменшеними кроками як по частоті, так і по гучності. Це може призвести до отримання більш деталізованої інформації щодо чутливості слуху на різних рівнях.

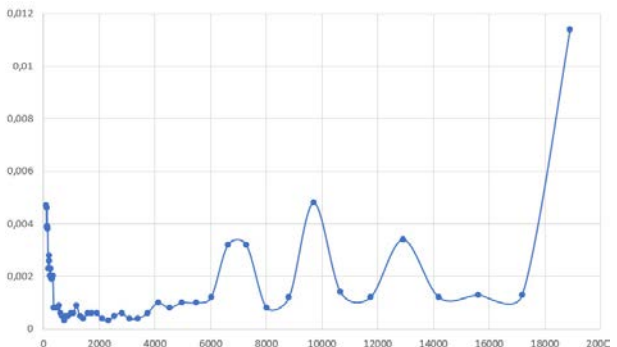


Рис. 4. Результат тестування слуху автора

Важливим аспектом є амплітудо-частотна характеристика навушників, в яких проводилось тестування, що може значно вплинути на результати. Однак це залишається неминучою проблемою, оскільки тестування проводиться в домашніх умовах, де доступ до спеціалізованого обладнання обмежений [4].

Додатково тестування пройшли ще декілька людей, на своїх комп'ютерах, без нагляду розробника, що дозволило провести тести максимально об'єктивно.

На рисунках 6–7 наведено результати тестів, де користувачі вірно налаштували свої прилади і результати можна вважати вірними.

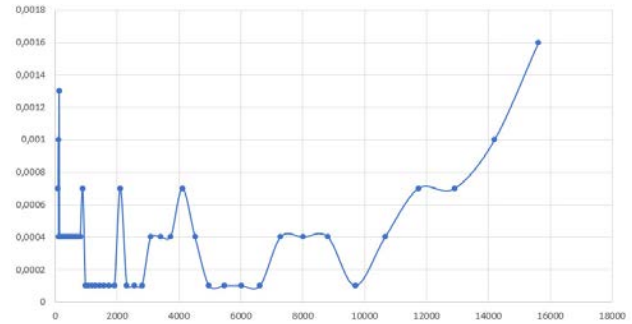


Рис. 5. Тест користувача 1

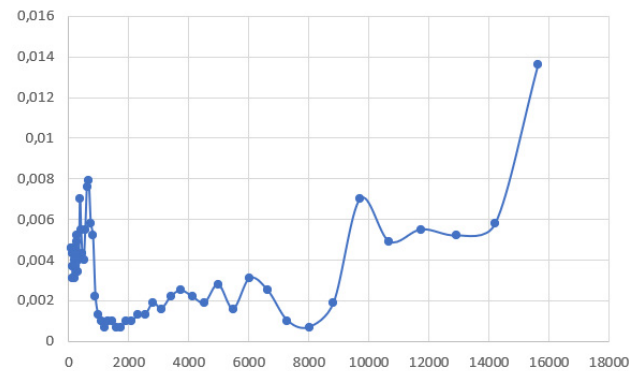


Рис. 6. Тест користувача 2

На рисунках 7–10 наведено результати, коли користувачі виставили на своїх пристроях занадто велику гучність, в наслідок чого вони чули будь яку частоту на мінімальній гучності, через що скрипт не мав змоги вірно оцінити їх аудитивне сприйняття.



Рис. 7. Тест користувача 3

Для уникнення таких помилок в майбутньому буде додано початкове налаштування гучності. Користувачу буде запропоновано виставити гучність пристрою так, що він ледве чув звук певної частоти, який генерується не на мінімальній

гучності. Наприклад на 30%. Такою дією буде виключено випадки коли користувачі випадково налаштовують свої пристрої на дуже велику гучність.

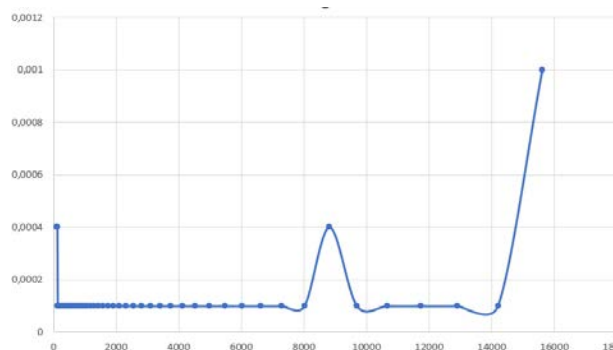


Рис. 8. Тест користувача 4

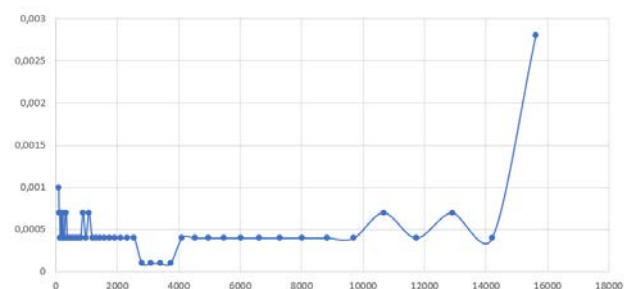


Рис. 9. Тест користувача 5

Висновки. У даній роботі була розроблена методика дослідження чутливості слуху, основана на використанні скрипта, що генерує звук різної частоти та гучності. Розроблений скрипт дозволяє ефективно визначити рівень чутливості слуху користувача, а також підтримує зручні умови для проведення тестування, не вимагаючи від користувача спеціальних навичок чи знань.

Метою нашого дослідження було визначення рівня чутливості слуху, яке може служити діагнос-

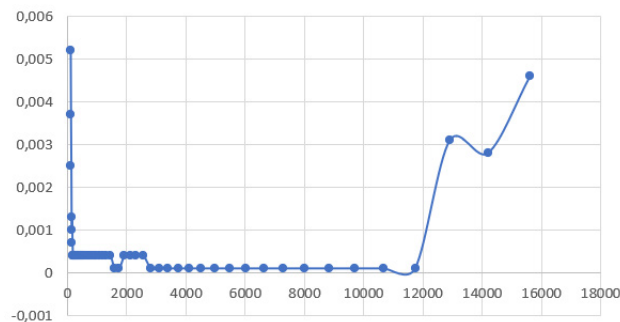


Рис. 10. Тест користувача 6

тичним показником різних захворювань слуху. Результати дослідження, представлені у вигляді таблиць та графіків, надають важливу інформацію щодо залежності чутливості слуху від частоти звуку для кожного учасника тестування.

Для поліпшення точності та надійності дослідження введено алгоритми, які адаптують параметри звуку до індивідуальних особливостей користувача. Ці алгоритми враховують реакцію користувача та оптимізують процес тестування.

У майбутньому можливі вдосконалення методики та скрипта, такі як збільшення кількості учасників дослідження, зменшення кроків зміни параметрів звуку, врахування додаткових факторів, і використання різних типів звуків. Також, інтеграція скрипта на веб-сторінку може значно розширити можливості та доступність тестування, дозволяючи будь-кому протестувати свій слух без встановлення додаткових засобів.

Загальні результати дослідження можуть бути корисні для розуміння впливу різних факторів на якість слуху та розвитку методик для діагностики захворювань слуху.

Список літератури:

1. Аудиометрія [Електронний ресурс] // Вікіпедія : вільна енциклопедія. – 2021. – Режим доступу: <https://uk.wikipedia.org/wiki/%D0%90%D1%83%D0%B4%D1%96%D0%BE%D0%BC%D0%B5%D1%82%D1%80%D1%96%D1%8F>
2. Аудиометр [Електронний ресурс] // Вікіпедія : вільна енциклопедія. – 2021. – Режим доступу: <https://uk.wikipedia.org/wiki/%D0%90%D1%83%D0%B4%D1%96%D0%BE%D0%BC%D0%B5%D1%82%D1%80>
3. Вправи для розвитку фонематичного слуху [Електронний ресурс] / Інститут дитячого інтелекту. – 2019. – Режим доступу: <https://idi.in.ua/vpravi-dlya-rozvitku-fonematchnogo-sluxu/>
4. Лебедев Д.Ю., Лисенко О.М. Проблеми метрологічного забезпечення засобів реєстрації отоакустичної емісії (ОАЕ). Медична інформатика та інженерія. – Київ. – № 1. – 2008. – С. 61–65.

Zagreba A.Ya., Lebedev D.Yu. IMPLEMENTATION OF A SOFTWARE APPLICATION FOR ASSESSING AUDITORY PERCEPTION IN USERS

This study focuses on the development of a software script for assessing auditory perception in users. In today's information society, where technologies are deeply integrated into all aspects of our lives, the ability to

interact with various audio content is of great importance. Research on users' auditory perception is a relevant task, as it can pave the way for further improvements in methods of enhancing auditory perception.

The evaluation of users' auditory perception requires highly accurate methods and effective tools. This study explores the development of a software script that systematically studies and analyzes the level of auditory perception under various conditions. The use of such a script can provide valuable data for understanding and improving the users' auditory experience.

To enhance the accuracy and reliability of the research, algorithms are introduced that adapt sound parameters to the individual characteristics of the user. These algorithms take into account the user's reactions and optimize the testing process.

The approach to creating the software script not only enables a detailed analysis of auditory perception but also opens the door to further research and development in the field of audio interfaces. This article presents the main principles of the script's functionality and discusses its potential applications and future research prospects.

The overall results of this study may contribute to understanding the impact of various factors on hearing quality and to the development of methods for diagnosing hearing disorders. Based on the research findings, an online service could be developed for self-assessment of hearing, enabling early detection of problems or tracking changes in the user's hearing condition.

Key words: *auditory perception, technological tools, interface development, interaction with sound environments, interactive research, audio technology, audio perception.*

Катін П.Ю.

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

Мишин О.В.

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

МЕТОДИКА ДЛЯ СПРОЩЕННЯ АНАЛІТИЧНОГО РОЗРАХУНКУ СПЕКТРУ СКЛАДНИХ ІМПУЛЬСНИХ СИГНАЛІВ В СИСТЕМАХ РАДІОКЕРУВАННЯ

У роботі надано методіку аналітичного розрахунку спектру модульованого імпульсного сигналу. Актуальність даного напрямку досліджень підтверджується значною кількістю публікацій, що присвячені радіокерованим системам (РКС) різного роду, частину з яких розглянуто в даній роботі. При дослідженні цих публікацій виявлено, що практично всі сучасні радіокеровані системи на теперішній час мають типові узагальнені структурні схеми на рівні об'єкта управління. В якості об'єктів управління зазвичай розглядаються квадрокоптери, радіокеровані моделі літаків, наземні керовані платформи, радіокеровані промислові механізми, тощо. Для управління виконавчими механізмами таких систем в багатьох випадках використовується імпульсні сигнали з різними видами модуляції, зокрема широтно-імпульсною модуляцією (ШІМ). В деяких радіокерованих системах сигнал модулюється високою частотою і передається безпосередньо в радіоефір з пульта управління оператора для радіокерованого об'єкта управління. Для забезпечення радіоелектронної сумісності і надійності роботи радіокерованої системи потрібний моніторинг сигналів управління на етапі розробки, випробування і експлуатації таких систем. Для цього використовують спектральне представлення сигналів. На теперішній час існує багато чисельних методів і програмних засобів для розрахунку спектрів складних сигналів, наприклад програма MathCard, MathLab. В той же час найбільш надійним і точним способом отримання спектру є аналітичний метод розрахунку. З іншого боку він є найбільш складним, а в деяких випадках точну аналітичну формулу рішення отримати неможливо.

Наведено первинні результати дослідження, що отримані під час роботи над методикою аналітичного розрахунку спектру широтно-імпульсного сигналу. Підтверджено можливість аналітичного розрахунку частотного спектру імпульсної послідовності сигналів різного роду модуляції, наведено основи методіки і приклади її використання в контексті застосування до модульованого імпульсного сигналу. Результати можуть бути застосовані для розробки (або вдосконалення) прикладного програмного забезпечення приладів, що призначені для моніторингу РКС на етапі розробки, випробування і експлуатації, вирішення окремих питань досягнення радіоелектронної сумісності та забезпечення надійності роботи. Визначено напрямки подальшого використання і покращення методіки.

Ключові слова: широтно-імпульсна модуляція, радіокеровані системи, спектр імпульсного сигналу, ряд Фур'є, перетворення Фур'є, методіка аналітичного отримання частотного спектру сигналу.

Постановка проблеми. Сучасні радіокеровані або напівавтономні пристрої є технічними системами реального часу (real-time technical systems (RTTS)) [1] з наявністю мікроконтролерного або мікропроцесорного управління. До радіокерованих або напівавтономних систем можна віднести промислові механізми (системи) із безпроводним управлінням, радіокеровані моделі літаків, наземні керовані платформи, квадрокоптери, тощо. Вони можуть постійно керуватися і контролюватися оператором через радіоканал. У випадку

зникнення (значного погіршення) зв'язку, ці системи відпрацьовують аварійну програму або переходять у автономний режим і використовують інші, автоматичні методи управління. Тому більшість радіокерованих систем можна вважати напівавтономними.

Узагальнені структурні схеми систем реального часу з програмним управлінням (RTTS) приведені в [1] (рис. 1 і рис. 2). На структурних схемах показані базові елементи систем. Як можна побачити з рис. 1 і рис. 2 [1], структурні схеми вклю-

чають виконавчі механізми, які у теперішній час керуються імпульсними сигналами. На відміну від структурної схеми, що наведена в [1], сучасні радіокеровані або напівавтономні системи додатково включають елементи радіокерування, а саме: пульт дистанційного управління оператора, об'єкт управління і складові елементи, що забезпечують радіоканал для взаємодії між пультом дистанційного управління та об'єктом управління. Всі інші елементи, в цілому, відповідають структурним схемам [1].

В деяких радіокерованих або напівавтономних системах в радіоканалі сигнал безпосередньо модулюється високою частотою, а управління об'єктом здійснюється цим сигналом. Активно використовується часове ущільнення. В умовах великої кількості сторонніх джерел радіовипромінювання (промислові, природні, та інші) можуть виникати навмисні або ненавмисні радіозавади каналу управління. Для захисту радіоканалу доцільно проводити моніторинг ефіру, результати якого представляються у вигляді частотного спектру. Найбільш точним способом отримання спектру є аналітичний метод розрахунку. Існує багато рішень з цього напрямку, в той же час питання формалізації методик аналітичного розрахунку частотного спектру модульованих імпульсних сигналів визначається недостатньо уваги.

Аналіз останніх досліджень і публікацій показав, що обраний напрям досліджень є дуже актуальним, що підтверджує достатня кількість свіжих публікацій [2–7]. На теперішній час активно провадяться наукові дослідження в галузі РКС, які в певних умовах можуть працювати як напівавтономні системи. Варіант прикладу програмної архітектури таких систем наведений в [2].

В [3–5] викладені результати досліджень інфраструктури для управління групою РКС на прикладі БПЛА, яку можна розповсюдити на інші класи РКС.

В [6, 7] описані складові елементи виконавчих механізмів РКС на прикладі силових установок БПЛА. В той же час вищезгадані роботи не містять результатів досліджень теорії сигналів для управління виконавчими механізмами.

Результати сучасних теоретичних досліджень, що зв'язані з отриманням спектру складних сигналів представлені в [8–12]. В цих роботах наводяться приклади розрахунку спектрів, але наведені приклади є досить математично складними і, крім цього, не узагальнюються на інші види імпульсних сигналів.

Постановка завдання. Метою статті є розробка методики, що дає можливість спростити аналітичний розрахунок складних, модульованих сигналів в системах радіокерування за рахунок розбиття інтегралу перетворення Фур'є на імпульсні складові.

Розроблена методика буде перевірена на прикладі амплітудно модульованого імпульсного сигналу.

Виклад основного матеріалу. Для постановки завдання введемо вихідні дані щодо сигналу управління і внесемо обмеження для використання відомих математичних методів у ході формування методики.

Нехай в якості вихідного сигналу, що підлягає переведенню у частотний спектральний вигляд, використовується прямокутний імпульсний сигнал, на якому передбачена модуляція. Частота повторення імпульсів не змінюється. Звичайно, що для передачі сигналу через радіоефір використовуються імпульси, що модульовані високою частотою в той же час введемо обмеження щодо відсутності високочастотного заповнення. В практичних РКС період сигналу визначається приблизно в діапазоні 50–60 Гц.

В якості базової імпульсної послідовності для вищеприданого сигналу обираємо послідовність прямокутних відеоімпульсів. Даному сигналу, з великою точністю відповідає математична модель – нескінченна послідовність прямокутних імпульсів, що визначається на позитивній і негативній ділянці вісі абсцис. Ця періодична послідовність має фіксований період, амплітуду і тривалість імпульсів. Крім того вона має такий зсув відносно вісі ординат, що найближчий прямокутний імпульс до вісі ординат у точці ($t=0$) розділяються цією віссю на дві рівних частини (рис. 1). Такий зсув не зменшує узагальнення досліджень, спрощує отримання аналітичних виразів і є загальноприйнятним для розрахунку спектру. Далі будемо називати цю послідовність базовою моделлю сигналу (БМС).

В першій частині, як на підготовчому етапі і для перевірки коректності результатів методики, розглянемо аналітичне отримання частотного спектру для БМС з використанням ряду Фур'є. Далі сформуємо методику отримання частотного спектру з використанням перетворення Фур'є на основі БМС. Для перевірки коректності методики порівняємо отриманий результат з рядом Фур'є.

В другій частині застосуємо методику для аналітичного розрахунку модульованих сигналів. В якості математичної моделі сигналу використаємо БМС, що буде промодульований синусоїдальним сигналом. Отриманий результат

в перспективі буде розповсюджений на моделювання сигналом довільної форми.

1. Методика знаходження частотного спектру сигналу для нестандартних випадків.

1.1 Використання ряду Фур'є для отримання частотного спектру базової моделі сигналу.

БМС є періодичною, кусочно-монотонною і обмеженою, що дозволяє розкласти її в ряд Фур'є.

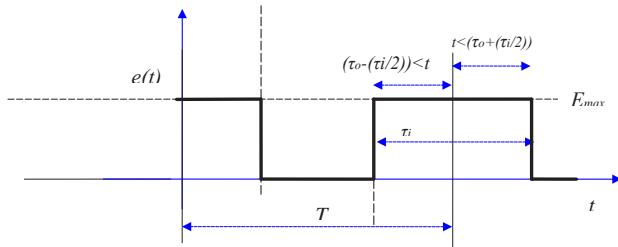


Рис. 1. Позитивна сторона базової моделі сигналу

Позначимо характеристики БМС для подальших розрахунків наступним чином: A – амплітуда сигналу, T – період повторення, τ – ширина імпульсу.

Відомо, що, спектр періодичних сигналів є дискретним, приймає ненульові значення лише на частотах, кратних частоті слідування імпульсів. Застосуємо комплексну форму ряду Фур'є (1) для лаконічності результатів рішення.

$$f(t) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} C_n e^{i \cdot n \frac{2\pi t}{T}} \quad (1)$$

В виразі (1) складова C_n – комплексна амплітуда n -ї гармоніки, яка визначається інтегралом (2), що береться на інтервалі шириною в один період:

$$C_n = \frac{1}{T} \int f(t) e^{-i \cdot n \frac{2\pi t}{T}} dt \quad (2)$$

Користуючись (2) розрахуємо C_n для одного імпульсу, з урахуванням наведених раніше припущень. В результаті алгебраїчних перетворень і розрахунків отримаємо:

$$C_n = \frac{1}{T} \int_{-\frac{\tau}{2}}^{\frac{\tau}{2}} A e^{-i \cdot n \frac{2\pi t}{T}} dt = \frac{A}{T} \left(\frac{e^{-i \cdot n \frac{2\pi \tau}{2T}} - e^{-i \cdot n \frac{2\pi (-\frac{\tau}{2})}{2T}}}{-i \cdot n \frac{2\pi}{T}} \right) = A \frac{\tau}{T} \frac{\sin\left(n\tau \frac{\pi}{T}\right)}{n\tau \frac{\pi}{T}} \quad (2^*)$$

Як можна побачити з вищенаведеного виразу (2*), та з урахуванням (1), амплітуда складових спектру обмежується значенням функції $\sin(x)/x$, з точністю до константного множника.

Наведені обмеження(вимоги періодичності, нескінченності за часом та обмеженості) виконуються і для ШІМ сигналу практичних РКС, що дозволило б використовувати метод використання ряду Фур'є в таких випадках. В той же час, є корисним розглянути більш загальний метод, що використовує перетворення Фур'є, і може бути використаний.

1.2 Методика знаходження частотного спектру сигналу. Як було сказано раніше, в реальних РКС, в практичних умовах випробувань або експлуатації, може статися так, що наведені обмеження на нескінченність сигналу не завжди можуть бути виконані. Це може статися під час наявності природних або промислових радіозавад. В цьому випадку використовується перетворення Фур'є.

Визначимося, що кожний коефіцієнт ряду Фур'є (1) описує інтенсивність (амплітудні і частотні характеристики) певної гармоніки нескінченного ряду Фур'є, що може бути представлена в тригонометричній або комплексній формі.

В той же час результатом перетворення Фур'є є густина спектру на даній частоті. Далі буде доведено, що для БМС густина спектру співпадає з результатами ряду Фур'є при однакових характеристиках сигналу. Відома формула для перетворення Фур'є визначається виразом (3).

$$s(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} f(t) e^{-i \cdot \omega t} dt \quad (3)$$

Відповідно (3), вихідну послідовність БМС, що являє собою нескінченну послідовність відеоімпульсів на всій вісі абсцис, потрібно проінтегрувати із додатковим множником від нескінченності до нескінченності. Таким чином на першому етапі методики вихідний сигнал (БМС) потрібно інтегрувати на ненульових значеннях, в межах кожного імпульсу.

На другому етапі потрібно розділити (3), на суму інтегралів. Кожний елемент цієї суми буде відповідати інтегралу, взятого на тривалості відповідного імпульсу БМС. Пронумеруємо імпульси (і відповідні інтеграли) БМС так, що нульовим імпульсом буде той, що розділений віссю ординат на 2 частини. Імпульси, що знаходяться на від'ємній частині вісі абсцис мають номери -1, -2, ..., а на позитивній частині – +1, +2, ...

Скористаємося (3) і, урахувавши обмеження БМС, введемо позначення для результату інтегрування кожного елемента I_j у інтегралі (3), отримаємо:

$$s(\omega) = \sum_{j=-\infty}^{\infty} \int_{jT-\frac{\tau}{2}}^{jT+\frac{\tau}{2}} A e^{-i \cdot \omega t} dt = \sum_{j=-\infty}^{\infty} I_j \quad (4)$$

В виразі (4) значення I_j є результатом знаходження визначеного інтегралу, що відповідає імпульсу з номером j .

На наступному етапі знайдемо інтеграл для нульового імпульсу I_0 , після відповідних обчислень і перетворень отримаємо результат (5):

$$I_0 = \int_{-\frac{\tau}{2}}^{\frac{\tau}{2}} A e^{-i \omega t} dt = \frac{A \left(e^{\frac{i \omega \tau}{2}} - e^{-\frac{i \omega \tau}{2}} \right)}{i \omega} = \frac{2A}{\omega} \sin\left(\frac{\omega \tau}{2}\right) = A \tau \frac{\sin\left(\frac{\omega \tau}{2}\right)}{\frac{\omega \tau}{2}} \quad (5)$$

Розрахуємо результат для довільного I_j , взявши інтеграл. Аналіз результатів (5) і (6) дає можливість зробити висновок про наявність зв'язку I_0 і I_j та можливість виразити довільне I_j через I_0 .

$$I_j = \int_{jT-\frac{\tau}{2}}^{jT+\frac{\tau}{2}} Ae^{-i\omega t} dt = \frac{A \left(e^{i\omega \left(\frac{\tau}{2} - jT \right)} - e^{-i\omega \left(\frac{\tau}{2} - jT \right)} \right)}{i\omega} \quad (6)$$

Шляхом алгебраїчних перетворень виразимо довільне I_j через I_0 і отримаємо вираз:

$$I_j = \int_{jT-\frac{\tau}{2}}^{jT+\frac{\tau}{2}} Ae^{-i\omega t} dt = I_0 e^{-ij\omega T} \quad (7)$$

На наступному етапі методики відокремимо нескінченну суму (4) на 3 складові: перша – I_0 , друга – I_j для позитивній частині вісі абсцис та третя – I_j для від'ємної частини. В результаті відокремлення частин, з урахуванням зв'язку довільного I_j та I_0 , що визначається виразом (7), можемо записати наступний вираз:

$$s(\omega) = \sum_{j=-\infty}^{\infty} I_j = \sum_{j=-\infty}^{\infty} I_0 e^{-ij\omega T} = I_0 \sum_{j=-\infty}^{\infty} e^{-ij\omega T} \quad (8)$$

Шляхом простих перетворень отримаємо:

$$s(\omega) = \left(\sum_{j=1}^{\infty} e^{-ij\omega T} + \sum_{j=1}^{\infty} e^{ij\omega T} + 1 \right) I_0 \quad (8)$$

Для отримання частотного спектра у аналітичному вигляді для БМС розглянемо два випадки: коли частоти у виразі (8) кратні частоті повторення імпульсів моделі сигналу T і коли частоти не є кратними.

Якщо частота ω кратна частоті імпульсів, то показник ступеня експоненти, що являє собою комплексну форму тригонометричного виразу, дасть узагальнене значення:

$$-i \cdot j \cdot 2 \cdot \pi \cdot k$$

Оскільки j, k – цілі числа, значення показнику ступеня експоненти буде кратним 2π . Тоді вираз в показнику ступеня експоненти, що позначає тригонометричний вираз, буде еквівалентним 0, а результат відповідної експоненти буде дорівнювати 1. Таким чином, якщо частота ω в виразі (8) є кратною частоті імпульсів в БМС, значення складових (8) буде відрізнятися від 0.

Доведемо, що для інших частот, для яких $\omega T \neq 2\pi$, відповідно $\omega T \neq \frac{2}{T}\pi$ значення спектральної щільності БМС будуть дорівнювати 0. Для цього застосуємо до перших двох складових виразу (8) формулу суми геометричної прогресії, що дасть результат, показаний у (9), (10). В такому випадку кожна з цих нескінченних сум

являє собою суму нескінченної геометричної прогресії.

$$\sum_{j=1}^{\infty} e^{-ij\omega T} = \frac{e^{-i\omega T}}{1 - e^{-i\omega T}} = \frac{1}{e^{i\omega T} - 1} \quad (9)$$

$$\sum_{j=1}^{\infty} e^{ij\omega T} = \frac{e^{i\omega T}}{1 - e^{i\omega T}} \quad (10)$$

Підставимо результати (9), (10) у вираз (8). Це дозволяє переписати (8) як результат складання формул геометричної прогресії для позитивної і негативної частини вісі абсцис. Виконувачі елементарні перетворення отримаємо для випадку некратних частот тотожність (11).

$$s(\omega) = \left(\sum_{j=1}^{\infty} e^{-ij\omega T} + \sum_{j=1}^{\infty} e^{ij\omega T} + 1 \right) I_0 = I_0 \left(1 + \frac{1 - e^{i\omega T}}{e^{i\omega T} - 1} \right) = 0 \quad (11)$$

Таким чином, ґрунтуючись на результаті показаному у виразі (11) і на виразі (8), можна стверджувати, що на всіх частотах, крім кратних частоті імпульсів, спектральна щільність БМС має нульове значення. Для частот, кратних частоті імпульсів, отримаємо результат:

$$C(\omega) = \frac{I_0}{T} = A \frac{\tau}{T} \frac{\sin\left(\tau \frac{\omega}{2}\right)}{\tau \frac{\omega}{2}} \quad (12)$$

Результат перетворення Фур'є для БМС призводить до виродження щільності в дискретний вигляд, він також, в цілому, співпадає з результатом розкладення в ряд Фур'є для БМС сигналу з однаковими характеристиками.

На рис. 2. наведено графічно порівняння отриманого результату зі спектром БМС. Синім кольором позначено огинаючу, розраховану за (12).

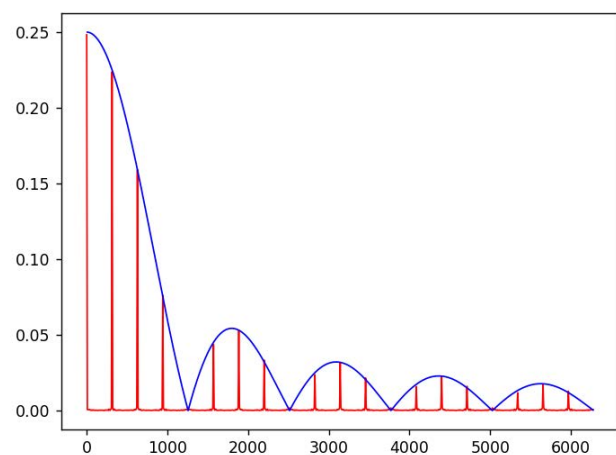


Рис. 2. Результат частотного спектру з використанням перетворення Фур'є

ґрунтуючись на вищевикладеному, сформуємо загальну методику, що буде застосована для розрахунку частотного спектру сигналу на основі БМС.

А. Відповідно виразу перетворення Фур'є, розділимо інтеграл для знаходження щільності (3) на суму інтегралів кожного імпульсу БМС. Запишемо нескінченну суму для БМС у вигляді (4).

Б. Розділимо нескінченну суму (4) для послідовності імпульсів (БМС) на три складові: для імпульсів на позитивному боці вісі абсцис, від'ємної частини вісі абсцис і нульовий елемент. Для цього доцільно ввести нумерацію імпульсів (і відповідних інтегралів) БМС так, що нульовим імпульсом буде той, що розділений віссю ординат на 2 частини. Імпульси, що знаходяться на від'ємній частині вісі абсцис мають номери $-1, -2, \dots$, а на позитивній частині $+1, +2, \dots$.

В. У п. 1.2 доведено, що частоти, що є кратними частоті повторення імпульсів не є нульовими. Всі інші частоти для БМС будуть нульовими, що доведено вище.

Г. Знайдемо інтеграл для нульового імпульсу I_0 . Для модульованих сигналів, у I_0 з'явиться додаткова складова, що визначається законом модуляції.

Д. Ґрунтуючись на п. 2–4 знаходимо значення частотного спектру у вигляді остаточної формули.

2. Знаходження частотного спектру модульованого сигналу методом перетворення Фур'є. Скористуємося методикою, що отримана вище для знаходження частотного спектру модульованого сигналу.

Для наочності в даному прикладі розглянемо один з найпростіших випадків модуляції: амплітудну модуляцію сигналу. Амплітудна модуляція майже ніколи не використовується для імпульсної послідовності, і використовується лише як теоретичний приклад з відомим результатом для демонстрації застосування методики.

Базовою послідовність для імпульсного сигналу є послідовність БМС.

Амплітуда імпульсів сигналу модульована синусоїдальним сигналом з частотою Ω , яка набагато менше за частоту повторення імпульсів БМС. Це звичайне фізичне обмеження для такого випадку модуляції, приклад показаний на рис. 3. Період сигналу залишається не змінним. Модулювання здійснюється синусоїдальною функцією, нульовий початок відліку якої співпадає з БМС. Ґрунтуючись на вищеописаному, можна записати:

$$A \rightarrow A(t) = A_0 + \Delta A \sin(\Omega t), \quad (13)$$

Тобто замість константи імпульсу БМС з'являється функція часу, що буде ураховано при використанні результатів п. 1 у ході використання методики.

Слід зазначити що є 2 способи амплітудної модуляції імпульсу: зі змінною амплітудою впродовж імпульсу, та зі сталою амплітудою. Тут буде розглядатись перший випадок, але відмінність не буде суттєвою, в залежності від способу вибору результуючої амплітуди імпульсу.

Отриманий сигнал є періодичним, за періодом модулючої синусоїди. Для знаходження частотного спектру скористаємося методикою, що отримана і перевірена в п. 1. Ми знаємо з її результатів, що отриманий спектр буде дискретним, приймаючи ненульові значення лише для частот, кратних частоті цієї синусоїди, відповідно результатам методики.

На першому етапі скористаємося формулою перетворення Фур'є і відокремимо, не змінюючи загального характеру рішення, один період функції модуляції сигналу (ФМС). Відповідно до постановки завдання і внесених обмежень, він містить послідовність імпульсів БМС. Для модульованого сигналу модифікуємо методику, ураховуючи, функціональну залежність від часу

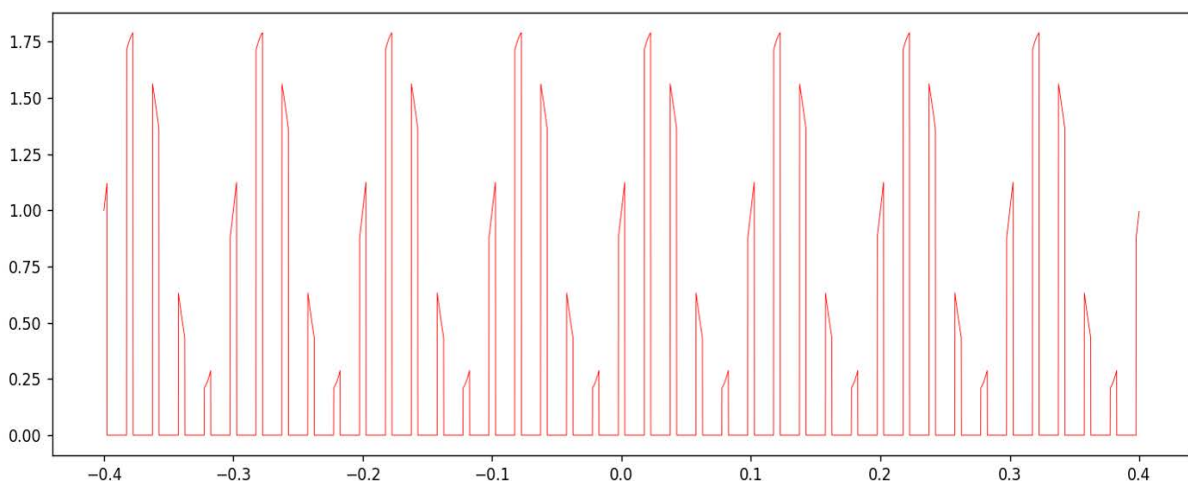


Рис. 3. Амплітудно модульований імпульсний сигнал

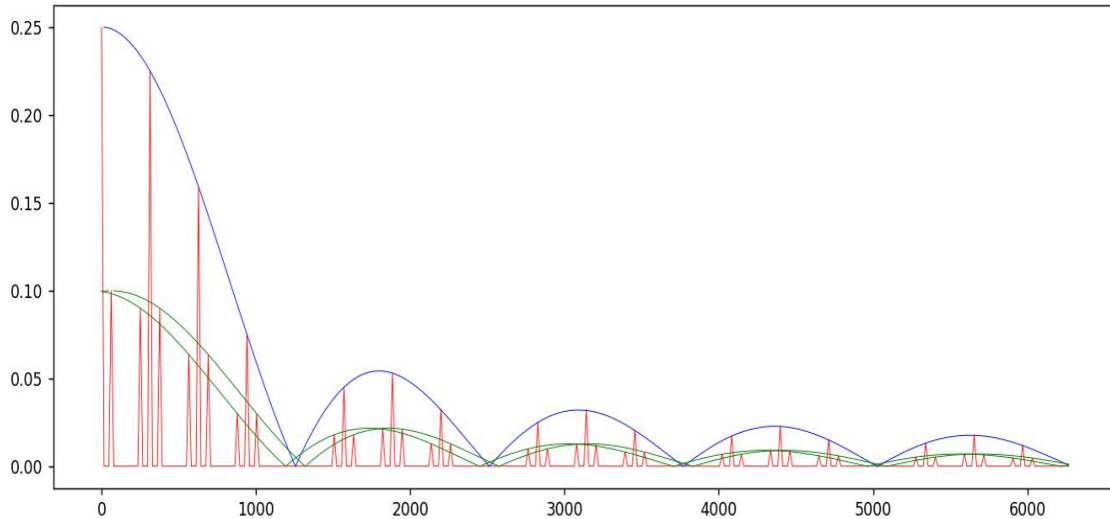


Рис. 4. Спектр амплітудно модульованого імпульсного сигналу

амплітуди імпульсів. Введемо позначку N , яка буде відповідати кількості імпульсів БМС в одному періоді ФМС. Тоді, з урахуванням введених позначень п. 1, для одного періоду ФМС перетворення (3) набуває вигляду:

$$s(\omega) = \frac{1}{TN} \sum_{j=0}^{N-1} \int_{jT-\frac{T}{2}}^{jT+\frac{T}{2}} A(t) e^{-i\omega t} dt = \frac{1}{NT} \sum_{j=0}^{N-1} I_j$$

Розпишемо підінтегральний вираз, підставивши $A(t)$ і розкривши синус через уявні експоненти:

$$\begin{aligned} A(t)e^{-i\omega t} &= A_0 e^{-i\omega t} + (\Delta A e^{i\Omega t} e^{-i\omega t} - \Delta A e^{-i\Omega t} e^{-i\omega t})/2i = \\ &= A_0 e^{-i\omega t} + \frac{\Delta A}{2i} e^{-i(\omega-\Omega)t} - \frac{\Delta A}{2i} e^{-i(\omega+\Omega)t} \end{aligned}$$

Відповідно, кожна компонента суми розіб'ється на 3 доданки. Просумуємо окремо перші, другі і треті доданки.

Сума перших доданків дасть нам такий ж результат, що і для немодульованого сигналу, оскільки їх вид співпадає з видом I_j немодульованого сигналу. Вона дасть нам спектр виду (12).

Сума других доданків дасть нам схожий результат, оскільки їх вид співпадає з першими, лише з іншим константним множником та зсувом частоти на Ω вправо.

Аналогічно сума третіх доданків дасть нам такий ж спектр, але зсунутий вліво.

Результуючий спектр буде мати вигляд суми 3 немодульованих спектрів, з однаковими частотами. Основний спектр залежить лише від середньої амплітуди, періоду та тривалості імпульсів, а бічні гармоніки крім цього також залежать від амплітуди модулюючої синусоїди (вона дає множник амплітуди гармонік) та частоти цієї синусоїди (вона дає значення зсуву).

На рисунку 4 наведено вигляд спектру та огинаючі для гармонік, розраховані за отриманими результатами.

Як видно, розраховані результати достатньо точно відповідають дійсності.

Подальша робота буде проводитись в наступних напрямках:

1. Дослідження більш складних модуляцій та їх спектрів.
2. Модуляція складними сигналами.
3. Вплив випадкових шумів на спектр сигналу.

Висновки. Одержана і перевірена методика розрахунку спектру імпульсного сигналу з використанням розбиття інтегралу перетворення Фур'є на імпульсні складові. Цей результат при подальшому дослідженні може бути застосований для більш складних випадків модуляції.

Список літератури:

1. Katin P., Chmelov V., Shemaev V. Development of Typical „State“ Software Patterns for CortexM Microcontrollers in Real Time. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. 2020. N 3 (9(105)). P. 29–38. URL: <https://ssrn.com/abstract=3719729>.

2. С.І. Альперт, М.І. Альперт, П.Ю. Катін, Н.О. Літвінова. Програмно-апаратна інфраструктура наземної автономної платформи з елементами штучного інтелекту. 2021. Математичні машини і системи. 2021. № 1. С. 24–30. <https://doi.org/10.34121/1028-9763-2021-1-24-31>.

3. Яровий О.В. Завгородній В.В. Розробка структурної схеми системи управління мобільними агентами. Вчені записки ТНУ імені В.І. Вернадського. Серія: технічні науки. 2023. Том 34 (73) № 4. С. 124–127. <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2023.4/20>
4. Сушин І.О., Буткевич Г.Ю. Методика оцінки зв'язності вузлів бездротової сенсорної мережі при умові використання багаторівневої мережі телекомунікаційних аероплатформ. Вчені записки ТНУ імені В.І. Вернадського. Серія: технічні науки. 2023. Том 34 (73) № 6. С. 39–45. <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2023.6/07>
5. Сайко В.Г. Наритник Т.М. Модель забезпечення функціонування інтегрованої інфраструктури на базі літаючої мережі БПЛА. Вчені записки ТНУ імені В.І. Вернадського. Серія: технічні науки. 2023. Том 34 (73) № 4. С. 5–10. <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2023.4/02>
6. Довбиш І.О. Муравйов О.В. Галаган Р.М. Богдан Г.А. Момот А.С. Силові установки та джерела енергії сучасних БПЛА. 2023. Вчені записки ТНУ імені В.І. Вернадського. Серія: технічні науки. Том 34 (73) № 5. С. 16–20. DOI <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2023.5/04>
7. Муравйов О.В., Довбиш І.О., Галаган Р.М., Богдан Г.А., Момот А.С. Перспективи розвитку технологій та підвищення рівня автономності БПЛА. Вчені записки ТНУ імені В.І. Вернадського. Серія: технічні науки. 2023. Том. 34 (73). № 2. С. 199–205.
8. Є.В. Вербицький. Особливості розрахунку спектру напруги, модульованої по закону ШІМ I і II на основі подвійного ряду Фур'є. 2015. ElectronComm, Vol. 20, №5(88). С. 36–45.
9. Zi Tao1, a , Li Zhi2,b , Jia Long3. The SPWM Pulse Width Signal Spectrum Analysis Based on MATLAB Advanced Materials Research Online. 2013. Vols. 756–759, pp 4147–4151 doi:10.4028/www.scientific.net/AMR.756-759.4147.
10. Soumya S. Dr. B. V. Sumangala. Application Of Space Vector Modulation Technique For Three Level Neutral Point Clamped Inverters. International Journal of Engineering Research & Technology (IJERT). 2013. Vol. 2 Issue 6. С. 2909-2913 www.ijert.org.
11. Hang Zhu, Yubin Lan, Wenfu Wu. Development of a PWM Precision Spraying Controller for Unmanned Aerial Vehicles. College of Biological and Agricultural Engineering, Jilin University, Changchun 130022, P. R. China <https://www.ars.usda.gov/>
12. Bello, Abdulkabir. Radio Frequency Toolbox for Drone Detection and Classification (2019). Master of Science (MS), Thesis, Electrical & Computer Engineering, Old Dominion University, DOI: 10.25777/9gkmjd54 https://digitalcommons.odu.edu/ece_etds/160

Katin P.Yu., Mishyn O.V. METHODOLOGY FOR SIMPLIFYING THE ANALYTICAL CALCULATION OF THE SPECTRUM OF COMPLEX PULSE SIGNALS IN RADIO CONTROL SYSTEMS

This work provides a technique for analytical calculation of the spectrum of a modulated pulse signal. The relevance of this direction of research is confirmed by a significant number of published works focused on various kinds of radio-controlled systems (RCS), some of which are analyzed in this paper. Analysis of such works confirms that practically all modern radio-controlled systems currently have typical generalized structural schemes at the level of the control object. Quadcopters, radio-controlled model airplanes, ground-controlled platforms, radio-controlled industrial mechanisms, etc. are usually considered as such control objects. To control the executive mechanisms of such systems, pulse signals with various types of modulations, in particular pulse-width modulation (PWM), are used in many cases. In some radio-controlled systems, the signal is modulated at a high frequency and transmitted directly from the operator's control panel for the radio-controlled control object. To ensure the radio-electronic compatibility and reliability of the radio-controlled system, it is necessary to monitor the control signals at the stage of development, testing and operation of such systems. The spectral representation of signals is generally used for this task. Currently, there are many numerical methods and software tools for calculating the spectra of complex signals, such as MathCard, MathLab. At the same time, the most reliable and accurate way of obtaining the spectrum is the analytical method of calculation. It is, however, the most complex, and in some cases an exact analytical formula for the solution is impossible to obtain.

In this work, the primary research results obtained during work on the method of analytical calculation of the spectrum of the pulse width signal are presented. The possibility of analytical calculation of the frequency spectrum of a pulse sequence of signals of various types of modulation is confirmed, the basics of the technique and examples of its use in the context of application to a modulated pulse signal are shown. The results can be applied to the development (or improvement) of the application software of the devices intended for monitoring the RCS at the stage of development, testing and operation, solving certain issues of achieving radio-electronic compatibility and ensuring the reliability of operation. Directions for further use and improvement of the methodology are determined.

Key words: pulse-width modulation, radio controlled systems, spectrum of pulse signal, Fourier series, Fourier transform, technique for analytical calculation of the frequency spectrum of a signal.

Мадінов М.Л.

Державний університет інформаційно-комунікаційних технологій

ДОСЛІДЖЕННЯ НЕЛІНІЙНИХ ЕФЕКТІВ, ЩО ВИНИКАЮТЬ ПРИ РОЗПОВСЮДЖЕННІ СОЛІТОНІВ В ВОЛОКОННО-ОПТИЧНИХ СИСТЕМАХ ПЕРЕДАЧІ

У статті представлено всебічне дослідження балансу між дисперсійними та нелінійними ефектами у волоконно-оптичних системах передачі, зосереджуючись на тому, як ці фактори впливають на стабільність солітону та продуктивність передачі даних. Солітони, які є стабільними хвильовими пакетами, що самопідсилюються, відіграють вирішальну роль у підтримці цілісності даних під час передачі на великі відстані. Дослідження підкреслює важливість управління нелінійними взаємодіями, особливо на високих рівнях потужності або на великих відстанях передачі, для запобігання зіткненням солітонів, тремтіння синхронізації та спектрального розширення.

Обговорюються фундаментальні принципи волоконно-оптичної передачі, порівнюючи її з традиційною мідною проводкою, підкреслюючи переваги оптичних волокон у спрямуванні світлових імпульсів уздовж визначених шляхів для ефективною передачі даних. У міру того, як швидкість передачі даних зростає, а майбутні прогнози досягають 400 Тбіт/с або навіть 5–100 Пбіт/с за допомогою методів просторового мультиплексування, розуміння та контроль нелінійних ефектів стає важливим для оптимізації продуктивності. Нелінійні явища, такі як спричинена Керром самофазова модуляція (SPM), крос-фазова модуляція та чотирихвильове змішування, є критичними факторами, які впливають на поведінку солітонів і цілісність сигналу.

Дослідження включає в себе різні системні параметри, включаючи бітрейт, пропускну здатність і просторові властивості оптичних волокон, щоб оцінити ефективність передачі солітонів. Це підкреслює важливість збалансування нелінійних змін показника заломлення з хроматичною дисперсією для забезпечення мінімального спотворення сигналу. Продуктивність системи оцінюється через спектральну ефективність (γ_{agr}) і пропускну здатність, які безпосередньо пов'язані з динамікою солітонного імпульсу. Удосконалені методи мультиплексування, такі як мультиплексування за довжиною хвилі (WDM) і мультиплексування з просторовим розподілом (SDM), досліджуються на предмет їхньої ролі у збільшенні загальної пропускну здатності шляхом передачі кількох потоків даних одночасно.

Описано нелінійне рівняння Шредінгера (NLSE), яке керує розповсюдженням солітонів, ілюструючи, як баланс між дисперсією та нелінійними ефектами впливає на стабільність солітонів. У ньому розглядається, як нелінійні фазові зсуви, що є наслідком SPM, і спектральне розширення впливають на поширення солітонів. Дослідження далі вивчає нелінійні механізми посилення та втрати, такі як вимушене комбінаційне розсіювання, які сприяють еволюції солітонів.

Ключові слова: солітон, оптичне волокно, передача, сигнал, нелінійний ефект, стабільність.

Постановка проблеми. Сигнали, що передаються в оптичних волокнах, можуть призвести до нелінійних ефектів через непружні зіткнення. Залежно від оптичної інтенсивності можуть виникнути два різні нелінійні ефекти: вимушене комбінаційне розсіювання та вимушене розсіювання Бріллюена. Обидва ці нелінійні ефекти залежать від інтенсивності, але поріг оптичної інтенсивності для вимушеного бріллюенівського розсіювання значно нижчий порівняно з комбінаційним розсіюванням. Навіть на нижчих рівнях потужності бріллюенівське розсіювання може відбуватися спонтанно, оскільки воно обумовлене розсіюванням фонів, що утворюються термічно. Вища вхідна оптична потужність призвод-

ить до генерації великої кількості фонів, і коли дві зустрічні оптичні хвилі у волокні перетинаються, вони створюють рухому решітку показника заломлення. Чим більша відбита оптична сила, тим міцніша решітка, що призводить до вищої ефективної відбивної здатності. Коли падаюча оптична потужність перевищує певний поріг, стимульовані фони Бріллюена можуть розсіювати значну частину падаючої оптичної потужності назад до вхідного кінця оптичного волокна. Для кремнеземних оптичних волокон сам матеріал виявляє відносно слабкі нелінійні ефекти, але поєднання малої ефективної площі моди та великої довжини розповсюдження в оптичному волокні значно посилює ці нелінійні ефекти.

Солітони являють собою унікальний клас оптичних імпульсів, які зберігають свою форму та швидкість, коли вони поширюються через нелінійне середовище, яким є оптичні волокна. У волоконно-оптичних системах передачі солітони виникають завдяки точному балансу між двома протилежними ефектами: дисперсією, яка має тенденцію розширювати імпульс, і нелінійністю Керра, яка його стискає. Ця рівновага дозволяє солітонам проходити великі відстані, не зазнаючи типових спотворень і деградації стандартних оптичних імпульсів.

Нелінійні ефекти у волоконній оптиці, особливо викликані ефектом Керра, відіграють центральну роль у динаміці солітонів. Ефект Керра викликає зміну показника заломлення волокна пропорційно інтенсивності світла, що проходить через нього. Це призводить до самофазової модуляції (self-phase modulation – SPM), де фаза солітонного імпульсу змінюється відповідно до його власної інтенсивності. У випадку кількох солітонів, що поширюються одночасно, виникає перехресна фазова модуляція (cross-phase modulation – XPM), коли на фазу одного солітону впливає присутність інших. Крім того, чотирихвильове змішування (FWM), інший нелінійний ефект, може генерувати нові частотні компоненти, ще більше ускладнюючи процес передачі сигналу.

У системах на основі солітонів керування цими нелійними взаємодіями має вирішальне значення для мінімізації спотворення сигналу та підтримки стабільності імпульсів солітонів. Такі методи, як керування дисперсією, яке передбачає чергування сегментів волокна з різними дисперсійними властивостями, допомагають контролювати поширення солітонів на великі відстані, забезпечуючи вищу точність передачі.

Аналіз останніх досліджень і публікацій.

У науково-дослідницькому просторі сьогодення з'являються роботи, присвячені досліджуваній проблематиці. Зокрема, у роботі [1] був представлений модифікований розширений прямий алгебраїчний метод (Modified Extended Direct Algebraic Method – MEDAM), який пропонує структурований підхід до розв'язування нелінійних диференціальних рівнянь у частинних похідних (nonlinear partial differential equation – NLPDE) шляхом перетворення їх у звичайні диференціальні рівняння (ordinary differential equations – ODE). Спочатку MEDAM застосовує хвильове перетворення, щоб спростити NLPDE в ODE. Це перетворення передбачає вираження залежної змінної через хвильову функцію та нову координату. Отримане ODE потім

аналізується шляхом представлення його рішення у вигляді ряду, де коефіцієнти ряду визначаються за допомогою правил балансування, застосованих до ODE.

Крім того, метод включає розв'язання системи нелінійних алгебраїчних рівнянь, отриманих шляхом підстановки представлення ряду назад в ODE. Для отримання точних результатів на цьому етапі часто потрібні обчислювальні інструменти, такі як Mathematica. Змінюючи параметри в цих рівняннях, MEDAM створює конкретні рішення, включаючи яскраві солітони та періодичні рішення, які ілюструють універсальність методу в обробці різних типів нелінійних явищ.

У практичних застосуваннях, таких як дробові похідні або конкретні фізичні моделі, MEDAM демонструє свою ефективність, перетворюючи складні NLPDE у простіші форми. Це перетворення досягається за допомогою стратегічних перетворень і замінів, що дозволяє отримати значущі рішення, які відповідають умовам початкової проблеми.

Робота [2] зосереджується на дослідженні хаотичної динаміки та стійкості у збуденій динамічній системі з використанням як аналітичних, так і чисельних методів. Дослідження починається з перетворення керівних диференціальних рівнянь у динамічну систему та включення збудень для дослідження потенційної хаотичної поведінки. Двовимірні фазові діаграми збуденої системи аналізуються зі зміною параметрів збудення, виявляючи, як різна інтенсивність збудення впливає на динаміку системи.

Щоб оцінити стабільність системи, проводиться аналіз чутливості шляхом вивчення реакції системи на зміни початкових умов і значень параметрів. Цей аналіз, підкріплений графічними зображеннями, демонструє, як незначні коригування початкових умов призводять до розбіжних траєкторій, підкреслюючи чутливість системи та вказуючи на зони потенційної нестабільності.

У статті використовуються математичні методи, включаючи $f + (G'/G)$ – метод розширення, щоб отримати та візуалізувати рішення оптичних солітонів. Результати демонструють різні типи солітонів, у тому числі періодичні, темні, кінк-хвилі та хвилі проти кінків, із детальною візуалізацією, наданою для різних налаштувань параметрів [2].

Дослідження роботи [3] забезпечує огляд оптичних солітонних рішень комплексно модифікованої моделі Чен-Лі-Лю (Chen-Lee-Liu – CLL). Використовується узагальнений метод

($G/G\phi$)-розкладання для отримання та дослідження різноманітних солітонних рішень, включаючи періодичні, сингулярні та компактні форми. Перший сегмент аналізу зосереджений на отриманні явних солітонних рішень за різних обмежень параметрів. Маніпуляція параметрами q і r дозволяє досліджувати сценарії, де ці параметри дорівнюють нулю або не дорівнюють нулю, що призводить до рішень, які описуються гіперболічними, тригонометричними та іншими функціональними формами.

Друга частина дослідження зосереджена на фізичній інтерпретації та наслідках цих рішень. За допомогою програмного забезпечення Mathematica, генеруються детальні тривимірні та двовимірні графічні представлення солітонних рішень, які з'ясовують динамічну поведінку цих рішень у діапазоні значень дробових параметрів і часових змін. Графічні результати надають візуальне уявлення про те, як профілі солітонів змінюються з часом, висвітлюючи періодичні, дзвоноподібні та сингулярні періодичні форми.

Необхідно зауважити, що, окрім висвітлених робіт, Крім того, варто зазначити праці наступних науковців: П. Еллаппан, М. Аннамалай, Р. Равічандран [4], П. Гао, Б. Сунь, Дж. Лю [5], Ф. Бадшах, К. Тарік, М. Інк, М. Аслам, М. Зішан [6], А. Халіфа, А. Ахмед, Н. Бадра, Х. Ахмед, М. Мірзазаде, М. Хашемі, М. Байрам [7], К. Окамото [8], М. Бабер, М. Ясін, Н. Ахмед, С. Алі, М. Алі [9], Х. Кемпф, М. Хагнер, П. Зульцер, К. Рік, А. Лейтенсторфер [10], Е. Аслан, Д. Деніз, М. Інк [11], А. Сечер, І. Ондер, Х. Есен, Н. Оздемір, М. Чинар, Х. Чакіджіоглу, С. Дурмус, М. Озісік, М. Байрам [12], М. Мурад, Х. Ісмаель, Т. Сулейман А. [13], М. Ікбал, Ст. Фаріді, Р. Алі, А. Сідаві, А. Раджі, А. Анкі, А. Духдух, С. Аламрі [14], М. Ахмед, А. Арнус, К. Гепріл, А. Сесер [15] тощо.

Разом з цим, враховуючи складність феномену поширення солітонів у волоконно-оптичних системах передачі можна констатувати, що не всі аспекти цієї наукової проблематики вивчено та висвітлено у наукових працях. Зокрема, питання, пов'язане з дослідженням нелінійних ефектів, які виникають при розповсюдженні солітонів в волоконно-оптичних системах передачі, станом на теперішній час залишається недостатньо дослідженим та потребує подальших розвідок у цьому напрямі.

Постановка завдання. Метою роботи є дослідження нелінійних ефектів, що виникають при розповсюдженні солітонів в волоконно-оптичних системах передачі.

Викладення основного матеріалу. Баланс між дисперсійним і нелінійним ефектами гарантує, що солітони залишаються стабільними, але при високій потужності передачі або на великих відстанях нелінійні взаємодії можуть призвести до зіткнень солітонів, тремтіння синхронізації та спектрального розширення. Цими ефектами необхідно ретельно керувати, часто за допомогою методів керування дисперсією, щоб підтримувати цілісність солітонної передачі. Управління цими нелінійностями має вирішальне значення для підтримки високих швидкостей передачі даних у сучасних системах оптичного зв'язку, особливо тому, що методи мультиплексування та просторовий паралелізм розширюють межі пропускної здатності оптоволоконна.

Волоконно-оптичні системи передачі покладаються на особливості оптичних волокон як контрольного середовища для передачі даних. На відміну від традиційної мідної проводки, оптичні волокна направляють світлові імпульси, забезпечуючи ефективну передачу даних за визначеними шляхами. Оскільки швидкість передачі продовжує зростати, а майбутні прогнози передбачають швидкість передачі даних до 400 Тбіт/с або навіть до 5–100 Пбіт/с за допомогою методів просторового мультиплексування, розуміння нелінійних ефектів і керування ними є життєво важливим для оптимізації продуктивності.

Нелінійні ефекти відіграють вирішальну роль у поширенні солітонів у волоконно-оптичних системах передачі, які використовують світлові імпульси для передачі даних на великі відстані. У цьому контексті солітони є стабільними хвильовими пакетами, що самопідсилюються, які зберігають свою форму під час передачі завдяки балансу між дисперсією та нелійними ефектами в оптичному волокні. Цей баланс є ключовим для забезпечення високошвидкісної передачі даних без погіршення сигналу, яке зазвичай викликається дисперсією в звичайних оптоволоконних системах. Ці нелінійні ефекти включають спричинену Керром самофазову модуляцію, перехресну фазову модуляцію та чотирихвильове змішування, усі вони впливають на поведінку

Ефективність передачі солітонів регулюється взаємодією різних системних параметрів, таких як бітрейту V , пропускної здатності B і просторових властивостей оптичного волокна, включаючи діаметр серцевини D_{OF} . Підтримуючи баланс між нелінійною зміною показника заломлення та хроматичною дисперсією, солітони можуть подолати величезні відстані з мінімальним

спотворенням сигналу. Загальна продуктивність системи оцінюється за допомогою спектральної ефективності, γ_{agr} та пропускної здатності, які безпосередньо пов'язані з динамікою солітонного імпульсу. У сучасних волоконно-оптичних системах такі методи паралельної передачі, як мультиплексування за довжиною хвилі (wavelength-division multiplexing – WDM) і мультиплексування з просторовим розділенням (spatial-division multiplexing – SDM), дозволяють передавати кілька потоків даних одночасно, підвищуючи загальну пропускну здатність. Впровадження SDM, наприклад, є стратегією збільшення кількості просторових каналів, збільшення кількості солітонних потоків, що передаються через різні ядра чи режими волокна. Це збільшує сукупну спектральну ефективність системи, яка визначається як:

$$\gamma_{agr} = \gamma \times P_{spat} \quad (1)$$

де γ – спектральна ефективність на канал, а P_{spat} – коефіцієнт просторового мультиплексування. Тоді загальна пропускна здатність V_{OF} є функцією як спектральної ефективності, так і просторового паралелізму:

$$V_{OF} = F_{ct} \times \gamma_{agr} \times m \times \mu \times \psi \quad (2)$$

де F_{ct} представляє інтервал частот каналу, m кількість спектральних каналів, μ просторові моди та ψ кількість ядер. Це формулювання ілюструє, як нелінійні ефекти впливають на динаміку солітонів у волокну та як передові методи мультиплексування можуть пом'якшити їхній вплив для підвищення швидкості передачі даних.

Нелінійне рівняння Шредінгера (nonlinear Schrödinger equation – NLSE) керує поширенням солітонів в оптичних волокнах, описуючи, як змінюється складна огинаюча електричного поля $A(z, t)$ імпульсу під час його проходження волокном:

$$\frac{\partial A(z, t)}{\partial z} + \frac{\beta_2}{2} \frac{\partial^2 A(z, t)}{\partial t^2} = i\gamma |A(z, t)|^2 A(z, t) \quad (3)$$

$A(z, t)$ відповідає амплітуді імпульсу в положенні z і часі t , β_2 – коефіцієнт дисперсії групової швидкості (group velocity dispersion – GVD), γ – нелінійний коефіцієнт, який залежить від показника заломлення волокна та ефективної площі моди, який визначений як:

$$\gamma = \frac{2\pi n_2}{\lambda_0 A_{eff}} \quad (4)$$

n_2 – нелінійний коефіцієнт заломлення матеріалу волокна, A_{eff} – ефективна зона режиму.

Баланс між дисперсійним членом $\frac{\beta_2}{2} \frac{\partial^2 A(z, t)}{\partial t^2}$ і нелінійним членом $i\gamma |A(z, t)|^2 A(z, t)$ відповідає

за утворення та поширення солітонів. Нелінійний зсув фази, який відчуває імпульс через ефект Керра, спричиняє самофазову модуляцію (SPM), тоді як дисперсія призводить до розширення імпульсу. Для солітонів ці два ефекти компенсуються, що призводить до стабільного поширення імпульсу без значних спотворень.

Солітонний порядок, який є мірою відносної сили нелінійності та дисперсії, визначається як:

$$N = \sqrt{\frac{\gamma P_0 T_0^2}{|\beta_2|}} \quad (5)$$

P_0 – пікова потужність імпульсу, T_0 – ширина імпульсу на половині максимуму, β_2 – коефіцієнт GVD.

Для базових солітонів ($N = 1$) імпульс зберігає свою форму під час поширення. Солітони вищого порядку (тобто $N > 1$) виявляють періодичні коливання у формі та спектрі під час їх поширення.

Ефект самофазової модуляції (self-phase modulation – SPM), викликаний нелінійним показником заломлення волокна, призводить до зсуву частоти солітону, подібного до зсуву частоти Бріллюена. Зсув можна описати як функцію інтенсивності солітону та нелінійного накопичення фази. Для солітону нелінійний фазовий зсув пропорційний його інтенсивності і може бути виражений як:

$$\Delta\phi_{SPM} = \gamma P_0 L_{eff} \quad (6)$$

де L_{eff} відповідає ефективній довжині волокна:

$$L_{eff} = \frac{1 - e^{-\alpha L}}{\alpha} \quad (7)$$

α – коефіцієнт загасання волокна, L – загальна довжина волокна. Нелінійний зсув фази, спричинений SPM, призводить до спектрального розширення солітонного імпульсу, що може впливати на стабільність імпульсу за певних умов.

Нелінійні механізми підсилення та втрат, такі як комбінаційне розсіювання та розсіювання Бріллюена, також сприяють еволюції солітонів у волокну. Комбінаційне розсіювання передає енергію від височастотних компонентів солітону до низькочастотних компонентів, що призводить до зсуву центральної частоти солітону вниз. Швидкість цього зсуву можна приблизно визначити таким чином:

$$d\lambda \approx -\frac{16\pi^3 n^2 P_0 T_0}{3\lambda_0^2 c A_{eff}} \quad (8)$$

де c – швидкість світла, λ_0 – центральна довжина хвилі, а z – відстань поширення. Цей зсув вниз, відомий як Раманівський зсув власної частоти, впливає на поширення солітонів на великі відстані.

Висновки. Дослідження демонструє, що ефективне управління взаємодією між дисперсією та нелінійними ефектами має важливе значення для оптимізації волоконно-оптичних систем передачі. Дослідження показує, що стабільність солітонів і цілісність даних тісно пов'язані з балансом між хроматичною дисперсією та нелінійними взаємодіями, такими як самофазова модуляція та чотирьоххвильове змішування. Аналізуючи ключові параметри системи та використовуючи передові методи мультиплексування, дослідження підкреслює, як точний контроль над цими факторами може підвищити загальну продуктивність сигналу та пропускну здатність.

Дослідження можливостей високошвидкісної передачі даних у поєднанні із застосуванням складних методів, таких як мультиплексування за довжиною хвилі та просторовим розподілом, під-

креслює потенціал для досягнення безпрецедентної пропускну здатності та ефективності оптичних комунікаційних мереж. Отримані результати дозволяють глибше зрозуміти роль нелінійного рівняння Шредінгера в розповсюдженні солітонів, підкреслюючи важливість керування нелінійними фазовими зрушеннями та спектральним розширенням для підтримки якості сигналу.

Підводячи підсумок, стаття підкреслює критичну потребу в ефективних стратегіях управління дисперсією для збереження цілісності солітонів і оптимізації високошвидкісної передачі даних у сучасних волоконно-оптичних системах. Він надає цінну інформацію про те, як передові методи мультиплексування та точний контроль нелінійних ефектів можуть підвищити продуктивність і пропускну здатність оптичних комунікаційних мереж.

Список літератури:

1. Highly dispersive gap solitons for conformable fractional model in optical fibers with dispersive reflectivity solutions using the modified extended direct algebraic method / Soliman M., Ahmed H., Badra N., Nofal T., Samir I. *AIMS Mathematics*. 2024. № 9. DOI:10.3934/math.20241229.
2. Shakeel M., Liu X., Alshammari F. Exploring the Depths: Soliton Solutions, Chaotic Analysis, and Sensitivity Analysis in Nonlinear Optical Fibers. *Fractal and Fractional*. 2024. № 8. 317 p. DOI:10.3390/fractalfrac8060317.
3. Assorted optical soliton solutions of the nonlinear fractional model in optical fibers possessing beta derivative. Islam M., Amin Md., Akbar Ali Md., Wazwaz A.-M., Osman M. *Physica Scripta*. 2023. № 99. 015227 p. DOI:10.1088/1402-4896/ad1455.
4. Ellappan P., Annamalai M., Ravichandran R. Dynamics of switching optical soliton in fiber with sixth order dispersion and inter modal dispersion. *Physica Scripta*. 2024. № 99. DOI:10.1088/1402-4896/ad4d20.
5. Gao P., Sun B., Liu J. Nonlinear Faraday magneto-optic effects in a helically wound optical fiber. 13 Jul. 2024. DOI:10.48550/arXiv.2407.09805.
6. On the study of bright, dark and optical wave structures for the coupled fractional nonlinear Schrödinger equations in plasma physics. Badshah F., Tariq K., Inc M., Aslam M., Zeeshan M. *Optical and Quantum Electronics*. 2023. № 55. DOI:10.1007/s11082-023-05434-z.
7. Discovering novel optical solitons of two CNLSEs with coherent and incoherent nonlinear coupling in birefringent optical fibers. Khalifa A., Ahmed A., Badra N., Ahmed H., Mirzazadeh M., Hashemi M., Bayram M. *Optical and Quantum Electronics*. 2024. № 56. DOI:10.1007/s11082-024-07237-2.
8. Okamoto K. Nonlinear Optical Effects in Optical Fibers. 2022. P. 219-269. DOI: <https://doi.org/10.1016/b978-0-12-815601-8.50005-7>.
9. Dynamical analysis and optical soliton wave profiles to GRIN multimode optical fiber under the effect of noise / Baber M., Yasin M., Ahmed N., Ali S., Ali M. *Nonlinear Dynamics*. 2024. P. 1-16. DOI:10.1007/s11071-024-10075-2.
10. An optical fiber integrated device for nonlinear generation of femtosecond mid-infrared pulses. Kempf H., Hagner M., Sulzer P., Riek C., Leitenstorfer A. *Applied Physics Letters*. 2024. № 124. DOI:10.1063/5.0208093.
11. Aslan E., Deniz D., Inc M. Multiwaves and optical soliton solutions with the concatenation model in the optical fibers. *Optical and Quantum Electronics*. 2024. № 56. DOI:10.1007/s11082-024-07356-w.
12. On Stochastic Pure-Cubic Optical Soliton Solutions of Nonlinear Schrödinger Equation Having Power Law of Self-Phase Modulation. Secer A., Onder I., Esen H., Özdemir N., Cinar M., Cakicioglu H., Durmus S., Ozisik M., Bayram M. *International Journal of Theoretical Physics*. 2024. № 63. DOI:10.1007/s10773-024-05756-y.
13. Murad M. A., Ismael H., Sulaiman T. A. Resonant optical soliton solutions for time-fractional nonlinear Schrodinger equation in optical fibers. *Journal of Nonlinear Optical Physics & Materials*. 2024. DOI:10.1142/S0218863524500243.
14. Dynamical study of optical soliton structure to the nonlinear Landau–Ginzburg–Higgs equation through computational simulation. Iqbal M., Faridi W., Ali R., Seadawy A., Rajhi A., Anqi A., Duhduh A., Alamri S. *Optical and Quantum Electronics*. 2024. № 56. 1192 p. DOI:10.1007/s11082-024-06401-y.

15. Analyzing the influence of multiplicative white noise on optical solitons in birefringent fibers through the perturbed Gerdjikov–Ivanov model / Ahmed M., Arnous A., Gepreel K., Secer A. *Optical and Quantum Electronics*. 2024. № 56. DOI:10.1007/s11082-024-07329-z.

Madinov M.L. STUDY OF NONLINEAR EFFECTS OF THE PROPAGATION OF SOLITONS IN FIBER-OPTIC TRANSMISSION SYSTEMS

The article provides a comprehensive examination of the balance between dispersion and nonlinear effects in fiber-optic transmission systems, focusing on how these factors impact soliton stability and data transmission performance. Solitons, which are stable wave packets that self-reinforce, play a crucial role in maintaining data integrity during transmission over long distances. The study highlights the significance of managing nonlinear interactions, particularly at high power levels or over extensive transmission distances, to prevent soliton collisions, synchronization jitter, and spectral broadening.

The article discusses the fundamental principles of fiber-optic transmission, contrasting it with traditional copper wiring by emphasizing the advantages of optical fibers in guiding light pulses along defined paths for efficient data transfer. Nonlinear phenomena such as Kerr-induced self-phase modulation (SPM), cross-phase modulation, and four-wave mixing are critical factors that affect soliton behavior and signal integrity.

The study incorporates various system parameters, including bit rate, bandwidth, and spatial properties of optical fibers, to assess soliton transmission efficiency. It underscores the importance of balancing nonlinear changes in the refractive index with chromatic dispersion to ensure minimal signal distortion. The performance of the system is evaluated through spectral efficiency and bandwidth, which are directly related to soliton pulse dynamics. Advanced multiplexing methods, such as wavelength-division multiplexing (WDM) and spatial-division multiplexing (SDM), are explored for their role in enhancing overall bandwidth by transmitting multiple data streams simultaneously.

The article also details the nonlinear Schrödinger equation (NLSE) that governs soliton propagation, illustrating how the balance between dispersion and nonlinear effects influences soliton stability. It addresses how nonlinear phase shifts, resulting from SPM, and spectral broadening affect soliton propagation. The study further examines nonlinear mechanisms of amplification and loss, such as stimulated Raman scattering, which contribute to soliton evolution.

Key words: *soliton, optical fiber, transmission, signal, nonlinear effect, stability.*

Маруняк С.Т.

Національний університет «Львівська політехніка»

ПІДВИЩЕННЯ ІНФОРМАЦІЙНОЇ БЕЗПЕКИ В ПРОТОКОЛАХ ДИНАМІЧНОЇ МАРШРУТИЗАЦІЇ ЗА ДОПОМОГОЮ МАШИННОГО НАВЧАННЯ З ВИКОРИСТАННЯМ НАЇВНОГО КЛАСИФІКАТОРА БАЙЄСА

Сучасні мережеві інфраструктури покладаються на протоколи динамічної маршрутизації, такі як BGP (Border Gateway Protocol) та OSPF (Open Shortest Path First), для забезпечення ефективної маршрутизації даних у мережах різного масштабу. Водночас ці протоколи можуть стати об'єктом атак, що загрожують безпеці та стабільності мереж. Атаки на доступність, зокрема denial-of-service (DoS) атаки, можуть спричинити перевантаження мережевих ресурсів та відмову в наданні послуг, що становить серйозну загрозу для корпоративних та державних інфраструктур. У цій статті досліджено можливість підвищення інформаційної безпеки в протоколах динамічної маршрутизації шляхом застосування машинного навчання, зокрема наївного класифікатора Байєса. Наївний Байєс дозволяє ефективно обробляти великі обсяги даних для швидкого виявлення та ідентифікації мережевих аномалій, що забезпечує можливість своєчасного реагування на загрози в реальному часі.

Однією з ключових переваг використання наївного класифікатора Байєса є його здатність швидко навчатися на обмежених вибірках даних, що дозволяє скоротити час на підготовку моделі та забезпечити її функціональність в умовах реального часу. Крім того, цей метод машинного навчання є стійким до змін у структурі даних, що робить його особливо корисним у динамічних мережах, де дані постійно оновлюються. У статті також проаналізовано, як можна підвищити точність класифікації за допомогою додаткових технік, таких як використання евристичних правил та фільтрація шумів у даних, що робить підхід більш адаптивним і точним для захисту протоколів маршрутизації від різних видів атак.

Стаття охоплює аналіз існуючих підходів до інформаційної безпеки в мережевих протоколах динамічної маршрутизації, а також досліджує роль машинного навчання у підвищенні рівня захисту від кіберзагроз. Описано етапи розробки рішення, починаючи з аналізу вразливостей мережі, збору й обробки даних для тренування моделі, та закінчуючи валідацією результатів і впровадженням рішення у реальній мережеві інфраструктурі. Особливу увагу приділено моніторингу й адаптації моделі для підтримки її актуальності та точності в умовах динамічних змін у мережевому середовищі. Також розглянуто перспективи інтеграції запропонованих рішень в існуючі мережі з мінімальними витратами на підтримку й адаптацію. Запропоноване дослідження може бути корисним фахівцям у сфері кібербезпеки, розробникам мережевих технологій, дослідникам, а також організаціям, що займаються захистом інформації у мережах критичної інфраструктури. Перспективи подальших досліджень включають оптимізацію моделей машинного навчання для кращої виявляємості складних загроз та розробку нових алгоритмів для захисту мереж від майбутніх викликів кібербезпеки.

Ключові слова: інформаційна безпека, динамічна маршрутизація, машинне навчання, наївний класифікатор Байєса, захист даних.

Постановка проблеми. У сучасному світі, де інформаційні технології глибоко інтегровані у всі сфери діяльності, забезпечення інформаційної безпеки є одним з найважливіших завдань. Особливе значення це має у контексті динамічних мережевих протоколів, які відіграють ключову роль у управлінні потоками даних у мережах. Традиційні методи забезпечення безпеки часто не можуть ефективно реагувати в контексті сучасних загроз, що вимагає інноваційних підходів. Одним із перспективних напрямків є використання

машинного навчання для аналізу та виявлення потенційних атак на динамічну маршрутизацію. В світлі цього важливо фокусуватися на дослідженні можливостей застосування наївного класифікатора Байєса для підвищення інформаційної безпеки в протоколах динамічної маршрутизації. Метод наївного класифікатора Байєса є актуальним завдяки його здатності ефективно обробляти великі обсяги даних і забезпечувати надійність при розпізнаванні шаблонів у складних даних, що є критично важливим для мережевої безпеки.

Наївний класифікатор Байєса, який базується на застосуванні теореми Байєса, є одним з найпопулярніших алгоритмів машинного навчання, здатний швидко адаптуватися до змін у вхідних даних, що є ідеальним для систем динамічної маршрутизації. Відповідно важливо проаналізувати основні виклики, з якими зіштовхуються традиційні системи безпеки та описати методологію використання наївного класифікатора Байєса для ідентифікації аномалій у поведінці маршрутизації. Крім того важливим є питання впровадження наївного класифікатора Байєса може значно знизити ризики пов'язані з мережевими атаками, зокрема, з атаками на маршрутизацію. Все це сприятиме кращому розумінню потенціалу машинного навчання у сфері інформаційної безпеки та надасть глибше розуміння науково-практичних аспектів застосування машинного навчання для зміцнення безпеки динамічних мережесистем.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Питанню посилення інформаційної безпеки в протоколах динамічної маршрутизації за допомогою машинного навчання присвячено значний масив робіт українських і закордонних дослідників. С. Сатья (S. Sathya), К. Умадеві (K. Umadevi) [1] вивчають питання розробки оптимізованого дистрибутивного безпечного протоколу маршрутизації з використанням динамічного розподілу ключів для підвищення безпеки в бездротових мережах. Автори намагались покращити мережеву безпеку за допомогою адаптивних технік управління ключами. А. Мудгерікар (A. Mudgerikar), Е. Бертіно (E. Bertino) [2] аналізують інтелектуальний безпечний маршрутизаційний протокол, який використовує методи безмодельного навчання з підкріпленням. Цей підхід дозволяє мережам самостійно адаптуватися до змін умов і потенційних загроз безпеці, оптимізуючи маршрутизацію в реальному часі. Л. Венкатраман (L. Venkatraman), Д. Агравал (D. Agrawal) [3] аналізують стратегії підвищення безпеки протоколів маршрутизації в мобільних ad hoc мережах (MANETs). Автори розглядають різні підходи до забезпечення цілісності, доступності та конфіденційності даних у таких мережах. Робота Х. Мудні (H. Moudni) та інші [4] зосереджена на покращенні безпеки в протоколі оптимізованої маршрутизації на основі стану зв'язків для мобільних ad hoc мереж. Автори впроваджують нові механізми захисту для зменшення вразливостей у маршрутизаційних протоколах. К. Чжу (Q. Zhu), Ж. Сонг (J. Song), Т. Басар (T. Başar) [5] аналізують питання динамічної маршрутизації в розподілених когні-

тивних радіомережах. Це включає стратегії, які дозволяють користувачам радіомережі ефективно адаптуватися до загроз безпеки і оптимізувати свої маршрутизаційні рішення. У проаналізованих вище дослідження в цілому розглянуто широкий спектр питань та технічних підходів у забезпеченні безпеки маршрутизації в різних типах мереж, від традиційних бездротових мереж до мобільних ad hoc і когнітивних радіомереж.

На сучасному етапі значна увага досліджень приділена покращенню маршрутизації та безпеки в різноманітних мережесистемах, використовуючи методи машинного навчання та глибокого навчання. У ряді досліджень висвітлено інноваційні підходи, які можуть бути використані для ефективнішої та безпечнішої маршрутизації. Дж. Надараджан (J. Nadarajan), Дж. Каліаперумал (J. Kaliyaperumal) [6] розробили алгоритм маршрутизації, який враховує якість обслуговування (QoS) та забезпечує безпеку за допомогою машинного інтелекту в мережах VANET наступного покоління. Цей алгоритм покращує надійність передачі даних та знижує затримку, що є критично важливим для систем з високими вимогами до часу реакції. М. Джонстон (M. Johnston), К. Данілов (C. Danilov), К. Ларсон (K. Larson) [7] дослідили застосування методів навчання при маршрутизації у тактичних мережах. Даний підхід дозволяє системі динамічно адаптуватися до змінних умов мережі, забезпечуючи високу надійність комунікацій. Ф. Ху (F. Hu) та інші [8] представили протокол безпечної маршрутизації для бездротових ad hoc мереж на основі глибокого навчання. Цей протокол використовує потужні можливості глибокого навчання для ідентифікації та запобігання безпековим загрозам в мережі. Ю. Ю (Y. Yu) та інші [9] запропонували схему безпеки маршрутизації на основі оцінки репутації в ієрархічних ad hoc мережах. Цей підхід дозволяє підвищити безпеку мережі через ефективне управління довірою між вузлами. Е. Геленбе (E. Gelenbe) [10] описує використання машинного навчання для маршрутизації в мережах, акцентуючи на тому, як сучасні технології можуть сприяти більш ефективному розподілу мережевого трафіку і зменшенню затримок. Висвітлені вище дослідження формують сучасний контекст розробки методів маршрутизації, що включають новітні досягнення в машинному та глибокому навчанні, надаючи потужні інструменти для забезпечення ефективності та безпеки мережесистем. Подані роботи також вказують на різноманітність потенційних застосувань та підходів, що можуть бути адаптовані до специфіки різних типів мереж.

В окремому масиві робіт зосереджено увагу на аспектах безпеки маршрутизації в різних типах бездротових мереж, включаючи мобільні ad hoc мережі (MANETs) і транспортні ad hoc мережі (VANETs), а також підходи до управління даними і оптимізації в системах прийняття рішень. А. Еччаахуї (A. Echchaachoui) та інші [11] описують методи асиметричного та динамічного шифрування для забезпечення безпеки маршрутизації в MANETs. Ці методики підкреслюють необхідність захисту від зовнішніх і внутрішніх загроз у динамічно змінюваних мережах. А. Амалія (A. Amalia) та інші [12] розглядають використання глибокого навчання для розробки протоколу безпечної маршрутизації, щоб уникнути атак типу «чорна діра» в VANETs. У роботі підтримано розвиток методів штучного інтелекту для забезпечення безпеки в складних і високодинамічних мережевих умовах. А. Снігуров В. Чакрян [13] вивчають особливості формування метрик маршрутизації, заснованих на ризиках інформаційної безпеки. Дослідники звертають увагу на необхідність врахування факторів інформаційної безпеки при проектуванні маршрутів у мережах. Крім того, у дослідженні [14] подано підхід до управління маршрутизацією в спеціальних бездротових телекомунікаційних мережах, що працюють в умовах інформаційної протидії. Дослідники акцентують на адаптації маршрутизаційних стратегій до постійно змінних умов зовнішнього середовища. В. Москаленко [15] описує інформаційно-екстремальне навчання системи підтримки прийняття рішень, яке включає адаптивну класифікацію даних. Цей підхід дозволяє підвищити ефективність обробки даних і прийняття рішень в складних умовах. В. Москаленко А. Рижова [16] досліджують інтелектуальну автоматизовану систему керування, що оптимізує часові параметри аналізу вхідних даних. У цій роботі вказано на шляхи покращення процесів аналітичної обробки для забезпечення оперативного реагування на змінні умови. Огляд вищезазначених досліджень підкреслює важливість інтеграції сучасних технологічних досягнень, таких як штучний інтелект та глибоке навчання, у розвиток мережевих безпекових протоколів і систем управління даними, що адаптуються до складних і динамічних умов. Однак, питання посилення інформаційної безпеки в протоколах динамічної маршрутизації в площині машинного навчання за рахунок інструментарію наївного класифікатора Байєса недостатньо розглянуто в наявному масиві досліджень і потребує додаткового вивчення.

Постановка завдання. Метою статті є аналіз методів підвищення безпеки в мережевих протоколах динамічної маршрутизації за рахунок застосування машинного навчання, зокрема наївного класифікатора Байєса. Дане дослідження покликано сприяти розширенню науково-практичних напрацювань з виявлення та запобігання можливим атакам на маршрутизаційні протоколи (BGP, OSPF), що покликано покращити здатність мережі розпізнавати та реагувати на неавторизовані чи шкідливі зміни в маршрутизації, тим самим забезпечуючи більш високий рівень інформаційної безпеки.

Виклад основного матеріалу. Протоколи динамічної маршрутизації є важливими в сучасному мережевому середовищі завдяки їхній здатності автоматично адаптуватися до змін у мережі. Ці протоколи за своєю природою автоматично додають інформацію з підключених маршрутизаторів до таблиць маршрутизації, гарантуючи, що кожен маршрутизатор має найновішу інформацію про топологію мережі. Цей процес додатково посилюється здатністю протоколів надсилати оновлення топології щоразу, коли відбувається зміна в структурі мережі, що дозволяє маршрутизаторам відповідно налаштувати свої таблиці маршрутизації для відображення цих змін. Відповідно динамічна адаптація полегшує використання найбільш ефективних або альтернативних шляхів для передачі даних, хоча це може призвести до потенційних перевантажень в разі керування неналежним чином. В рамках пом'якшення таких ускладнень, сучасні протоколи динамічної маршрутизації призначені для вибору маршрутів на основі мінімальної метрики або балансування трафіку між маршрутами з ідентичними метриками, таким чином оптимізуючи загальну продуктивність мережі. Цей динамічний автоматизований підхід до маршрутизації значно допомагає оптимізувати ефективність і надійність мережі, демонструючи розширені можливості протоколів динамічної маршрутизації в управлінні складними мережевими структурами.

В даному ключі важливо заглибитися в те, як конкретні протоколи, такі як BGP і OSPF, функціонують для оптимізації мережевої маршрутизації. Протокол BGP відіграє ключову роль у маршрутизації, дозволяючи інтернет-провайдерам, великим корпораціям та організаціям із загальнодоступними номерами автономної системи автономно обмінюватися інформацією про маршрутизацію без прямої залежності від постачальників послуг Інтернет-зв'язку. Ця автономія має вирішальне

значення для підтримки цілісності та ефективності архітектури глобальної маршрутизації Інтернет. З іншого боку, протокол OSPF використовує алгоритм найкоротшого шляху Дейкстри для динамічного перерахунку мережевих шляхів у відповідь на зміни топології, в такий спосіб підтримуючи безпечний і ефективний процес маршрутизації через автентифікацію змін протоколу та підтримку повної бази даних топології мережі. Завдяки використанню протоколів BGP і OSPF мережі досягають вищого ступеня масштабованості, надійності та безпеки, що є значним позитивним зрушенням у порівнянні з традиційними механізмами маршрутизації. Проте і ці протоколи мають свої особливості в контексті безпеки. Складність конфігурації протоколу OSP може призвести до помилок, які можуть бути використані зловмисниками. BGP підтримує автентифікацію, але залишається вразливим до таких атак, як hijacking, де зловмисники можуть перенаправляти трафік через небажані маршрути.

Внутрішні вразливості протоколів маршрутизації додатково ускладнюють контекст безпеки мережевої маршрутизації. Зокрема, протокол EIGRP має вразливості через свій механізм роботи, який не враховує кількість переходів під час розрахунку маршруту. Ця особливість може бути використана зловмисниками для маніпулювання шляхами маршрутизації непомічено, що загрожує цілісності та продуктивності мережі. Окрім того, маршрутизатори Cisco, широко використовувані у мережах, мають свої специфічні вразливості. Здатність зловмисників використовувати налаштування пропускну здатності інтерфейсів та статичні параметри затримки може призвести до зниження продуктивності мережі або навіть до її повного збою, що підкреслює критичні недоліки безпеки в конфігурації цих пристроїв. У сукупності, ці вразливості підкреслюють важливість жорстких заходів безпеки та необхідність постійного моніторингу та оновлення мережевих протоколів для захисту від нових загроз.

Спираючись на основу протоколів динамічної маршрутизації в мережах, застосування машинного навчання запроваджує трансформаційний підхід до керування та оптимізації цих мереж. Машинне навчання, зокрема через його здатність прогнозувати на основі відомих властивостей, отриманих із навчальних даних, являє значний поступ в управлінні мережею. Ця здатність машинного навчання додатково доповнюється методами інтелектуального аналізу даних, які значно підвищують точність механізму навчання

в мережах. Ці позитивні технологічні зрушення підкреслюють тенденцію до більш інтелектуальних, само-оптимізованих мереж, які можуть динамічно пристосовуватися до уподобань користувачів і нових проблем безпеки.

Наївний класифікатор Байєса є ключовим інструментом в машинному навчанні завдяки своїй простоті та ефективності у рішенні широкого спектру класифікаційних завдань. Алгоритм базується на теоремі Байєса, а його «наївність» полягає у припущенні, що використовувані ознаки є незалежними одна від одної. Це спрощення, хоч і може вести до неточностей, зазвичай не суттєво впливає на ефективність алгоритму у багатьох практичних застосуваннях. Широке використання цього методу у створенні специфічних функцій щільності ймовірностей (Specific Probability Density Functions – SPDF) для таких задач, як прогнозування часових рядів та використання байєсівських мереж, свідчить про його універсальність і здатність значно впливати на сферу статистичного розпізнавання образів (Statistical Pattern Recognition – SPR). Незважаючи на те, що наївний класифікатор Байєса може бути неоптимальним у сценаріях, де припущення про незалежність серйозно порушують базовий розподіл даних, його простота впровадження та низькі витрати на обчислення роблять його ефективним на ранніх стадіях розробки моделей або у програмах з обмеженими даними. Цей баланс між простотою та ефективністю забезпечує популярність наївного класифікатора Байєса і його значення у практиці машинного навчання.

У контексті динамічної маршрутизації, інтеграція специфічних практичних прикладів, таких як стохастична маршрутизація продуктивності процесу, сприяє підвищенню ефективності та надійності мережі. Розробка виявлення найкоротшого шляху (Shortest Path Discovery – SPD) та його впровадження на основі байєсівських мереж надає глибокі інсайти для оптимізації протоколів динамічної маршрутизації. Такі системи адаптуються до різних умов мережі, забезпечуючи надійніші шляхи передачі даних. Зокрема, використання SPD для прогнозування часових рядів дозволяє динамічним маршрутизаційним протоколам прогнозувати потенційні перевантаження та автоматично коригувати маршрути, зменшуючи затримки та втрати пакетів. Використання байєсівських мереж у SPD також дозволяє протоколам приймати обґрунтовані рішення, враховуючи ймовірність станів мережі, що підвищує надійність передачі даних у невизначених умовах.

Перехід до класифікаторів Байєса, особливо у контексті безпеки, зумовлений їх потенціалом для підвищення точності прогнозування та прийняття рішень у невизначених умовах. Практичне впровадження цих класифікаторів, як у випадках з послідовними тестами співвідношення ймовірностей, так і заснованими на байєсівських мережах, підкреслює їхню універсальність та ефективність у складних сценаріях безпеки. Такі методи є особливо дієвими у середовищах з невизначеним станом каналу, демонструючи, що традиційні методи розподілу потужності між передавальними антенами не завжди покращують частоту бітових помилок, що критично для забезпечення цілісності та безпеки зв'язку.

Застосування машинного навчання для динамічної маршрутизації вимагає розв'язання завдань, пов'язаних із забезпеченням конфіденційності та безпеки даних, що перетинають ці мережі. Використання технології блокчейн у цьому контексті підкреслює ефективність рішень на основі машинного навчання для динамічної маршрутизації. Однак, постійне оновлення моделей машинного навчання для адаптації до нових загроз і змін у топології мережі вимагає значних інвестицій у кваліфікацію персоналу та підтримку цих систем. Крім того, швидкі зміни мережевих конфігурацій потребують розробки моделей машинного навчання, які можуть швидко адаптуватися, мінімізуючи обчислювальні витрати та затримки.

В даному контексті сформуємо стратегію розробки та імплементації рішення на основі застосування наївного класифікатора Байєса. Стратегія розробки та імплементації рішення для підвищення інформаційної безпеки в протоколах динамічної маршрутизації за допомогою машинного навчання, зокрема через використання наївного класифікатора Байєса, охоплює декілька ключових етапів. На початковому етапі потрібно визначити цілі та вимоги до проекту. Це передбачає детальний аналіз поточної мережевої інфраструктури і виявлення можливих вразливостей у протоколах динамічної маршрутизації. Основою для цього є збір вхідної інформації через аналітичні звіти та експертні інтерв'ю. На основі цього аналізу формулюються конкретні цільові вимоги до безпеки, які будуть адресовані в проекті. Наступним кроком є збір та обробка даних. Це включає моніторинг мережевих активностей для збору даних про нормальну та аномальну поведінку у мережі. Зібрані дані підлягають попередній обробці, включаючи очищення та нормалізацію, а також виділення ознак, які будуть використані

для тренування моделі. Третім етапом є розробка моделі машинного навчання. Вибір падає на наївний класифікатор Байєса через його ефективність при роботі з великими обсягами даних і хорошу швидкість реакції на зміни. Модель тренується на зібраних даних, використовуючи методики крос-валідації для забезпечення її надійності та ефективності. Після тренування моделі відбувається її тестування та валідація. Тестування здійснюється на різноманітних сценаріях атак та при нормальній мережевій поведінці для визначення її стійкості та надійності. Ефективність моделі оцінюється за допомогою таких метрик, як точність, відгук та інші. Імплементація моделі включає її інтеграцію з існуючими мережевими протоколами, забезпечення сумісності з мережевими налаштуваннями, а також автоматизацію процесів виявлення та реагування на загрози на основі результатів класифікації. Завершальними етапами є моніторинг та налагодження системи, які передбачають постійне стеження за її роботою і регулярне оновлення моделі для адаптації до нових загроз та змін у поведінці мережі. Документування всіх процесів та тренування персоналу забезпечують стійке впровадження та ефективну експлуатацію системи в реальних умовах. Така інтегрована стратегія дозволяє ефективно вирішити завдання підвищення інформаційної безпеки в протоколах динамічної маршрутизації, використовуючи переваги машинного навчання. Запропоновану стратегію розробки та імплементації узагальнено подано в табл. 1.

Ця стратегія розробки та імплементації враховує як технічні, так і управлінські аспекти впровадження машинного навчання для забезпечення безпеки в протоколах динамічної маршрутизації.

Висновки. В підсумку, протоколи динамічної маршрутизації мають критично важливу роль в сучасних мережах, демонструючи їх здатність адаптуватися до змін у мережевій топології. Протоколи, такі як BGP та OSPF забезпечують вищу стійкість та безпеку мереж, однак, все ж мають певні вразливості, які в основному виникають в процесі аутентифікації. Інші протоколи, такі як EIGRP, також мають вразливості, що можуть бути використані для маніпуляцій з маршрутами. Враховуючи ці виклики, застосування машинного навчання, зокрема наївного класифікатора Байєса, виявляється перспективним для підвищення безпеки мережі. Машинне навчання дозволяє прогнозувати і адаптувати систему до змін, забезпечуючи автоматизацію процесів виявлення та реагування на аномалії в мережі.

Стратегія розробки та імплементації рішення на основі застосування наївного класифікатора Байєса

Етап	Завдання	Інструменти
1. Визначення цілей та вимог	Аналіз поточної ситуації та визначення вимог	Аналітичні звіти, інтерв'ю з експертами
	Цільові вимоги до безпеки	Стандарти безпеки, специфікації
2. Збір та обробка даних	Збір даних	Моніторинг мережі, логи
	Попередня обробка даних	Інструменти для обробки даних, нормалізація
3. Розробка моделі	Вибір моделі	Наївний класифікатор Байєса
	Тренування моделі	Крос-валідація, тренувальні та тестувальні датасети
4. Тестування та валідація	Тестування моделі	Сценарії атак, тестування стійкості
	Оцінка ефективності	Метрики ефективності, аналіз результатів
5. Імплементація	Інтеграція з існуючими системами	Технічна інтеграція, конфігурація
	Автоматизація процесів	Автоматизаційне ПЗ, скрипти
6. Моніторинг та налагодження	Моніторинг системи	Моніторинг в реальному часі, логіка виявлення
	Адаптація та оновлення	Оновлення ПЗ, адаптація до нових загроз
7. Документування та підтримка	Розробка документації	Керівництва для користувачів, технічна документація
	Навчання персоналу	Тренінги, семінари

Джерело: результат авторського аналізу

Запропонована стратегія розробки та імплементації рішення для підвищення інформаційної безпеки в протоколах динамічної маршрутизації з використанням наївного класифікатора Байєса є досить комплексною. В рамках даної стратегії першочергово проводиться детальний аналіз існуючої мережевої інфраструктури, де ідентифікуються потенційні вразливості, що дозволяє визначити конкретні цілі та вимоги до проекту. Після цього відбувається збір та попередня обробка даних, зокрема очищення та нормалізація, щоб виділити ознаки для тренування моделі. Розробка моделі машинного навчання включає вибір наївного класифікатора Байєса, який ефективно працює з великими обсягами даних і забезпечує швидку адаптацію до змін. Модель проходить ретельне тестування в різних сценаріях для оцінювання її стійкості та точності. Після цього відбувається її інтеграція в існуючі мережеві протоколи, що забезпечує сумісність і автоматизацію процесів виявлення та реагування на загрози. Завершальні етапи включають моніторинг та

налагодження системи, що дозволяє їй адаптуватися до нових викликів, а також документацію всіх процесів і навчання персоналу для забезпечення стійкого впровадження та ефективної експлуатації системи в реальних умовах. Такий інтегрований підхід підкреслює важливість комплексності в інформаційній безпеці і використання переваг машинного навчання для покращення захисту динамічної маршрутизації.

Стратегія імплементації має враховувати не лише технічні, але й управлінські аспекти впровадження таких технологій, включаючи навчання персоналу та постійний моніторинг системи для адаптації до нових загроз та змін у поведінці мережі, що підкреслює комплексний підхід до підвищення безпеки в протоколах динамічної маршрутизації.

Майбутні дослідження мають сконцентруватися на аналізі особливості розробки та впровадження стратегії посилення безпеки у мережевих протоколах динамічної маршрутизації в площині машинного навчання.

Список літератури:

1. Sathya S.S., Umadevi K. An optimized distributed secure routing protocol using dynamic rate aware classified key for improving network security in wireless sensor network. *Journal of Ambient Intelligence & Humanized Computing/ Journal of Ambient Intelligence and Humanized Computing*. 2020. №12(7). P. 7165–7171.
2. Mudgerikar A., Bertino E. Intelligent Security Aware Routing: Using Model-Free Reinforcement Learning. *2023 32nd International Conference on Computer Communications and Networks (ICCCN)*. P. 1–10. DOI: 10.1109/ICCCN58024.2023.10230195
3. Venkatraman L., Agrawal D. P. Strategies for enhancing routing security in protocols for mobile ad hoc networks. *Journal of Parallel and Distributed Computing*. 2013. №63(2). P. 214–227.
4. Moudni H., Er-Rouidi M., Faouzi H., Mouncif H., Hadadi B.E. Enhancing security in optimized link state routing protocol for mobile ad hoc networks. *Ubiquitous Networking*. Springer. 2017. pp. 107–116.

5. Zhu Q., Song J.B., Başar T. Dynamic Secure Routing Game in Distributed Cognitive Radio Networks. *2011 IEEE Global Telecommunications Conference – GLOBECOM 2011*. P. 1–6. URL: <https://researchr.org/publication/ZhuSB11> (date of appeal: 01.10.2024).
6. Nadarajan J., Kaliyaperumal J. QOS aware and secured routing algorithm using machine intelligence in next generation VANET. *International Journal of System Assurance Engineering and Management*. 2021. №1. P. 1–15.
7. Johnston M.R., Danilov C.B., Larson, K. A Reinforcement Learning Approach to Adaptive Redundancy for Routing in Tactical Networks. *MILCOM 2018 – 2018 IEEE Military Communications Conference (MILCOM)*. P. 267–272.
8. Hu F., Chen B., Shi D., Zhang X., Zhang H., Pan M. Secure Routing Protocol in Wireless Ad Hoc Networks via Deep Learning. *2020 IEEE Wireless Communications and Networking Conference (WCNC)*. P. 1–6. DOI: 10.1109/WCNC45663.2020.9120545
9. Yu Y., Guo L., Wang X., Liu C. Ruting security scheme based on reputation evaluation in hierarchical ad hoc networks. *Computer Networks*. 2010. №54(9). P. 1460–1469.
10. Gelenbe E. Machine Learning for Network Routing. *Mediterranean Conference on Embedded Computing*. 2020 9th Mediterranean Conference On Embedded Computing (MECO). Budva, Montenegro, 2020. P. 1–18.
11. Echchaachoui A., Choukri A., Habbani A., Elkoutbi M. Asymmetric and dynamic encryption for routing security in MANETs. *2014 International Conference on Multimedia Computing and Systems (ICMCS)*. P. 825–830.
12. Amalia A., Pramitarini Y., Perdana R. H. Y., Shim K., An B. A Deep-Learning-Based secure routing protocol to avoid blackhole attacks in VANETs. *Sensors*. 2023. №23(19). P. 8224.
13. Снегуров А., Чакрян А. Особливості формування метрики маршрутизації, що засновані на ризиках інформаційної безпеки. *Радіоелектроніка та молодь XXI століття : XVII міжнародний молодіжний форум : Збірник тез доповідей*. Харків, 2013. С. 226–227.
14. Снігуров А., Чакрян А. Підхід до управління маршрутизацією в безпроводових телекомунікаційних мережах спеціального призначення, функціонуючих в умовах інформаційної протидії. *Захист інформації і безпека інформаційних систем : II міжнародна наук.-техн.конф. : Збірник тез доповідей*. Львів, 2013. С. 16–17.
15. Москаленко В.В. Інформаційно-екстремальне навчання системи підтримки прийняття рішень з адаптивною кластеризацією даних. *Вісник Сумського державного університету*. 2012. № 3. С. 110–124.
16. Москаленко В., Рижова А. Інтелектуальна автоматизована система керування з оптимізацією часових параметрів аналізу вхідних даних. *Вісник Сумського державного університету*. 2013. №3. С. 7–14.

Maruniak S.T. ENHANCING INFORMATION SECURITY IN DYNAMIC ROUTING PROTOCOLS WITH THE HELP OF MACHINE LEARNING USING A NAIVE BAYES CLASSIFIER

Modern network infrastructures rely on dynamic routing protocols, such as BGP (Border Gateway Protocol) and OSPF (Open Shortest Path First), to provide efficient data routing in networks of varying scale. At the same time, these protocols can become the object of attacks that threaten the security and stability of networks. Availability attacks, including denial-of-service (DoS) attacks, can cause network resource overload and denial of service, posing a serious threat to corporate and government infrastructures. This article investigates the possibility of increasing information security in dynamic routing protocols by applying machine learning, in particular, a naive Bayes classifier. Naive Bayes enables efficient processing of large volumes of data for rapid detection and identification of network anomalies, enabling timely response to real-time threats.

One of the key advantages of using a naive Bayes classifier is its ability to quickly learn on limited data samples, which allows to reduce the time to prepare the model and ensure its functionality in real-time conditions. In addition, this machine learning method is robust to changes in the data structure, which makes it particularly useful in dynamic networks where data is constantly updated. The paper also analyzes how the classification accuracy can be improved using additional techniques, such as the use of heuristic rules and noise filtering in the data, which makes the approach more adaptive and accurate for protecting routing protocols against various types of attacks.

The article covers the analysis of existing approaches to information security in dynamic routing network protocols, and also explores the role of machine learning in increasing the level of protection against cyber threats. The stages of solution development are described, starting with the analysis of network vulnerabilities, collecting and processing data for model training, and ending with the validation of the results and the implementation of the solution in real network infrastructures. Special attention is paid to the monitoring and adaptation of the model to maintain its relevance and accuracy in the conditions of dynamic changes in the network environment. The prospects of integrating the proposed solutions into existing networks with minimal costs for support and adaptation are also considered. The proposed study can be useful to cyber security specialists, network technology developers, researchers, and organizations involved in information protection in critical infrastructure networks. Prospects for further research include optimizing machine learning models for better detection of complex threats and developing new algorithms to protect networks from future cyber security challenges.

Key words: information security, dynamic routing, machine learning, naive Bayes classifier, data protection.

Мустафасє О.В.

Український науково-дослідний інститут спеціальної техніки та судових експертиз
Служби безпеки України

СУЧАСНІ ТЕХНОЛОГІЇ ЗАХИСТУ ВІД GPS СПУФІНГУ У СИСТЕМАХ НАВІГАЦІЇ

У сучасних умовах активного використання безпілотних літальних апаратів (далі – БПЛА) у різних сферах життя, включаючи військову, цивільну авіацію та морську навігацію, питання захисту від загроз, пов'язаних з GPS спуфінгом, набуває особливої актуальності. GPS спуфінг – це технологія створення і передачі підроблених GPS сигналів з метою введення в оману приймачів навігаційних систем. Такі атаки можуть мати серйозні наслідки, зокрема втрату контролю над БПЛА або відхилення від заданого маршруту, що може призвести до катастрофічних подій.

Стаття аналізує сучасні технології захисту від GPS спуфінгу, які використовуються для забезпечення безпеки та надійності навігаційних систем. Зокрема, розглянуто основні підходи до виявлення та запобігання атакам спуфінгу, такі як аналіз сили сигналу, використання диференційного GPS (DGPS), мультичастотних та багатосистемних приймачів, а також аутентифікація сигналів.

Окремо висвітлено перспективи застосування методів машинного навчання для аналізу GPS сигналів та виявлення аномалій, які можуть вказувати на спуфінгові атаки. Зокрема, розглянуто використання нейронних мереж для розпізнавання підроблених сигналів, що підвищує ефективність захисту та знижує кількість помилкових тривог. Також розглянуто інтеграцію інерційних навігаційних систем (INS) з GPS для виявлення невідповідностей між даними навігації з різних джерел, що дозволяє забезпечити автономну навігацію під час атаки.

У статті представлено аналіз сучасних досягнень у сфері захисту від GPS спуфінгу, що підкреслює важливість безперервного розвитку методів протидії, зокрема в критичних сферах, таких як військові операції, авіація та автономні транспортні засоби. Висновки роботи спрямовані на необхідність впровадження новітніх технологічних рішень для забезпечення надійності та безпеки навігаційних систем у сучасних умовах.

Ключові слова: системи навігації, супутник, GPS спуфінг, сигнали завад, безпілотний літальний апарат, кібербезпека.

Постановка проблеми. Сучасні БПЛА оснащені новітніми технологіями, камерами, радарми тощо. Однак, попри їхню значимість, використання БПЛА супроводжується низкою викликів, серед яких особливо виділяється проблема GPS спуфінгу [1].

Техніка GPS спуфінгу (GPS spoofing) полягає у створенні та передачі підроблених сигналів GPS, з метою введення в оману приймачів навігаційних систем. Такі атаки можуть призводити до серйозних наслідків, особливо у військовій сфері, авіації, морській навігації та для безпілотних транспортних засобів. Наприклад, якщо приймач не має жодного захисту, БПЛА реагуватиме на будь-яку спробу підміни сигналу, через що автопілот намагатиметься компенсувати зміни фальшивого положення. Це може призвести до того, що БПЛА залишить межі підконтрольної зони. З огляду на це, дослідження захисту від GPS спуфінгу є актуальним завданням, яке вимагає впровадження сучасних технологічних рішень.

Аналіз останніх досліджень і публікацій.

З розвитком навігаційних систем і збільшенням їх залежності від GPS, проблема спуфінгу стає дедалі актуальнішою. Останні дослідження та публікації у цій сфері фокусуються на розробці нових технологій і підходів до захисту від таких атак. Отримані нові результати у цьому достатньо прогресивному напрямі представлені у роботах таких вчених, як: Бульба С.С., Волошин Д.Г., Кузьменко Н.С., Остроумов І.В., Петровський А.В., Харченко В.П., Afary A., Broumandan A., Bhatti J., Gonzalez R., Li X., Mojaradi B., Oligeri G., Sun C. та багато інших [2–4].

У наукових працях групи дослідників Корнельського університету, а саме: М. Psiaki, S. Powell, R. Mitch було запропоновано алгоритм для виявлення спуфінгу, який ґрунтується на апріорних знаннях про розташування супутників групами. Для реалізації алгоритму використовується нейронна мережа, що базується на класифікаторах MLP [5].

Варто зазначити, що більшість успішних результатів протидії спуфінгу розраховані на досить великі бюджети для їх реалізації (автоматизовані антени із специфічним програмним забезпеченням, новітні технології із залученням елементів штучного інтелекту тощо).

Фахівці з кібербезпеки зазначають, що головна проблема GPS систем полягає в слабких сигналах, які передаються з висоти приблизно 20 тисяч кілометрів над Землею, що призводить до перехоплення їх зловмисниками. Наприклад, дослідження в галузі криптографічного підписування сигналів і сертифікації з метою підтвердження їхньої достовірності стають все більш популярними. Ці методи передбачають використання спеціальних ключів для перевірки істинності сигналів.

Крім цього, досить складним завданням є створення спуфінгового поля в умовах міської забудови, де будівлі створюють перешкоди для відображення сигналу. До того ж радіоантени мають різну конфігурацію для справжніх сигналів, що надходять від супутників, і для сигналів перешкод, що ускладнює точне відтворення підроблених сигналів [6].

На основі аналізу наукових та практичних досягнень, в рамках тематики даної статті, виникає необхідність у розробці нових засобів радіоелектронної боротьби, засновані на фазочастотних методах вимірювання та обробки радіосигналів, оскільки, сучасні системи протидії часто характеризуються низькою енергоефективністю, обмеженим радіусом дії та високими витратами на виробництво. Представляє дослідницький інтерес розробка мобільних систем радіоелектронної боротьби, які могли б ефективно працювати із сучасними типами радіозв'язку, здійснювати вимірювання і генерацію радіосигналів, а також підтримувати канали для керування та передачі відеоінформації.

Постановка завдання. Мета статті – дослідження передових технологій захисту від GPS спуфінгу у системах навігації.

Виклад основного матеріалу. Під час вирішення практичних задач із участю БПЛА виникає необхідність у використанні GPS/GNSS для забезпечення високого рівня точності отриманих даних. Global Navigation Satellite System (GNSS) – це супутникова навігаційна система, призначена для визначення позиції об'єктів у просторі, тобто їхніх координат, напрямку руху, швидкості тощо. На сьогодні, близько 200 організацій, які збирають GNSS-дані з базових станцій по всьому світу, об'єднані в IGS (Міжнародну службу GNSS), що входить до складу Міжнародної асоціації геодезії. Найбільш ключовими та перспективними є такі GNSS системи: GPS (США), GELILEO (Євросоюз), BeiDou (Китай), QZSS (Японія).

Для забезпечення надійного захисту навігаційних систем від потенційних загроз необхідне

створення ефективної системи протидії спуфінгу. Розглянемо загальний алгоритм моделювання протидії спуфінгу:

1) аналіз вимог і визначення цілей (визначаються основні вимоги до системи захисту, зокрема, які загрози необхідно нейтралізувати, якими повинні бути параметри захищеності та точності);

2) розробка математичної моделі сценарію атаки (модель має містити параметри супутникових сигналів, алгоритми обробки сигналів у приймачі, а також методи виявлення аномалій, які можуть свідчити про спуфінгову атаку);

3) розробка та впровадження алгоритмів виявлення спуфінгу (розробляються алгоритми, до яких можуть входити аналіз потужності та характеристик сигналу, використання криптографічних методів для аутентифікації сигналів, інтеграція інерційних навігаційних систем для порівняння даних з незалежними джерелами тощо);

4) моделювання та симуляція сценаріїв спуфінгу (моделювання роботи навігаційної системи під впливом підроблених сигналів і перевірка роботи розроблених алгоритмів виявлення і захисту);

5) аналіз результатів та оптимізація (визначається ефективність алгоритмів виявлення спуфінгу, оцінюються їх точність, швидкість і надійність та, за необхідності, проводиться оптимізація параметрів системи та алгоритмів для покращення її продуктивності);

6) реалізація в реальних умовах і тестування (перевірка роботи системи у реальних умовах експлуатації, щоб оцінити її ефективність і надійність при реальних атаках спуфінгу).

В цілому результати моделювання GPS спуфінгу можуть бути взяті за основу для розробки та вдосконалення існуючих стандартів та рекомендацій щодо безпеки навігаційних систем. Це сприяє встановленню єдиних вимог і підходів до захисту від спуфінгу на міжнародному рівні.

Крім цього, моделювання дозволяє створювати реалістичні сценарії атак для навчання фахівців з кібербезпеки та операторів систем навігації.

Методи протидії спуфінговим атакам спрямовані на виявлення спровокованих сигналів завад. Вони можуть бути ідентифіковані за допомогою різних підходів, таких як:

– аналіз потужності вхідного сигналу (здійснюється контроль вхідної потужності сигналу, оскільки під час атаки вона може значно зрости через високу потужність сигналів перешкод і досягається шляхом спостереження за коефіцієнтом підсилення в модулі автоматичного регулювання підсилення);

– структурний аналіз потужності сигналів (використовуються циклостационарні властивості сигналів GNSS для виявлення підозрілих збільшень потужності структурованих сигналів, таких як коди розширення у прийнятих даних);

– оцінка співвідношення сигнал/шум (для кожного приймача визначають граничну верхню межу значення сигнал/шум, надмірне відхилення від якої вказує на спуфінгову атаку);

– моніторинг якості сигналу SQM (здійснюється ідентифікація асиметричних, аномально різких або підвищених піків кореляції);

– контроль часу прибуття сигналів (необхідно здійснювати моніторинг показники відстані між антенами спуфера і атакованого приймача, тому що такі відхилення провокують змінне зміщення годинника приймача, що дає змогу ідентифікувати спуфінгову атаку).

Класифікацію основних методів захисту від GPS спуфінгу наведено у Таблиці 1.

Попри потенційні переваги перелічених методів і підходів захисту, їх ефективність знижується через певні недоліки. Зокрема, інерційні навігаційні системи потребують постійного калібрування, що ускладнює їх використання. Також складність аналізу підроблених фреймів на комбінованих виходах GPS/INS та можливі проблеми з доступом до стільникового зв'язку і Wi-Fi у віддалених або важкодоступних районах значно ускладнюють точне виявлення спуфінгу.

Крім того, допоміжні системи позиціонування, які синхронізуються за часом за допомогою GPS, потребують додаткового резервування даних для забезпечення надійності.

Окрему увагу варто приділити методам, що використовують додаткову інформацію з візуальної одометрії (альтернативний метод для визначення позиції та переміщення об'єкта) та візуальної картографії в системах позиціонування. Проте, висока потреба в обчислювальних ресурсах і значні витрати обмежують практичне застосування цього методу.

У свою чергу, технічні засоби візуальної одометрії використовуються як додатковий інструмент у захисті від спуфінгу. Вони працюють незалежно від GPS та інших радіочастотних сигналів, що робить їх ефективним засобом в умовах радіочастотних завад.

Беручи до уваги опис значної кількості наявних технологій для захисту від GPS спуфінгу, які наведені у Таблиці 1, можна констатувати, що жодна з них не є абсолютно надійною та стабільною у сучасних реаліях стрімкого розвитку нанотехнологій. Зловмисники постійно розробляють нові методи атак, що змушує науковців і інженерів шукати вдосконалені рішення. Перспектив-

Таблиця 1

Методи захисту від GPS спуфінгу

Назва методу	Опис
Аналіз потужності сигналу та його характеристик	Один із простих методів захисту від спуфінгу полягає у моніторингу сили сигналу GPS. У випадку атаки спуфінгом, підроблені сигнали можуть мати значно вищу або нижчу силу порівняно з реальними сигналами супутників. Аналіз таких відхилень дозволяє виявляти спроби спуфінгу. Крім того, можна відслідковувати час приходу сигналів, їх частоту та фазу, щоб виявляти несумісності з реальними супутниковими сигналами.
Використання диференційного GPS (DGPS)	Технологія DGPS базується на використанні стаціонарних референсних станцій, які приймають сигнали GPS і передають корекційні дані мобільним приймачам. У разі спуфінгу, підроблений сигнал не буде узгоджуватися з корекційними даними від референсних станцій, що дозволить ідентифікувати загрозу. DGPS може значно підвищити точність і надійність навігації, знижуючи ймовірність успішної атаки.
Мультичастотні та багатосистемні приймачі	Сучасні навігаційні приймачі здатні працювати з сигналами від кількох супутникових систем, таких як GPS, ГЛОНАСС, Galileo та BeiDou, і приймати сигнали на різних частотах. Використання мультичастотних та багатосистемних приймачів підвищує стійкість до спуфінгу, оскільки для успішної атаки необхідно підробити сигнали всіх систем і частот, що є значно складнішим завданням.
Аутентифікація сигналів	Для захисту від спуфінгу можуть використовуватись криптографічні методи аутентифікації сигналів. Наприклад, у системі Galileo введено службу Open Service Navigation Message Authentication (OS-NMA), яка забезпечує перевірку автентичності сигналів, що передаються. Такі методи аутентифікації ускладнюють підробку сигналів, оскільки зловмисникам необхідно не тільки згенерувати правильний сигнал, але й правильно його підписати.
Фільтрація на основі машинного навчання	Застосування алгоритмів машинного навчання для аналізу сигналів GPS дозволяє розпізнавати аномалії, що можуть вказувати на спуфінг. Наприклад, нейронні мережі можуть навчатися розпізнавати типові характеристики підроблених сигналів, що дозволить виявляти атаки навіть за невеликих відхилень від норми. Цей підхід дозволяє підвищити ефективність захисту та зменшити кількість помилкових тривог.
Інтеграція з інерційними навігаційними системами (INS)	Інерційні навігаційні системи працюють на основі даних від акселерометрів і гіроскопів, які не залежать від супутникових сигналів. Інтеграція INS з GPS дозволяє виявляти невідповідності між даними навігації з різних джерел. У разі спуфінгу INS може забезпечувати автономну навігацію, поки не буде відновлено довіру до GPS-сигналів.

ними напрямками є поєднання кількох технологій одночасно, використання квантової криптографії для аутентифікації сигналів, а також розробка глобальних стандартів захисту навігаційних систем.

Висновки. Захист від GPS спуфінгу є важливою складовою забезпечення безпеки сучасних навігаційних систем. Різноманітні технології, такі як аналіз сигналів, диференційний GPS, мультичастотні приймачі, аутентифікація, машинне навчання та інтеграція з INS, дозволяють підвищити стійкість до атак. Проте постійний розвиток технологій спуфінгу вимагає від дослідників

безперервного вдосконалення методів захисту, що забезпечить надійність і безпеку в критичних сферах, таких як авіація, військові операції та автономні транспортні засоби.

Незважаючи на велику кількість наявних методів захисту, жоден з них не є абсолютно надійним, що обумовлює необхідність подальшого вдосконалення технологій захисту. Зокрема, перспективними напрямками є поєднання кількох технологій одночасно, використання квантової криптографії для аутентифікації сигналів, а також розробка глобальних стандартів захисту навігаційних систем.

Список літератури:

1. Матійчик М., Качало І. Тенденції застосування безпілотних повітряних суден в цивільній авіації. Матеріали XI міжнародної наук.-техн. конфер. "ABIA 2013". 2013. С. 97.
2. Milaat F.A. and Liu H. Decentralized Detection of GPS Spoofing. IEEE Commun. Lett. № 22. 2018. P. 1256–1259
3. Ostroumov I.V., Marais K., Kuzmenko N.S. Aircraft positioning using multiple distance measurements and spline prediction. Aviation. 2022. № 26(1). P. 1–10 doi: 10.3846/aviation.2022.16589.
4. Sun C., Cheong J.W., Dempster A.G., Zhao H., Demicheli L., Fen W. A. New Signal Quality Monitoring Method for Anti-spoofing. China Satellite Navigation Conference (CSNC) Proceedings, Springer. Singapore. 2018. P. 221–231.
5. Varshosaz M., Afary A., Mojaradi B., Saadatseresht M. Spoofing Detection of Civilian UAVs Using Visual Odometry. ISPRS International Journal of Geo-Information № 9. Ebadat. 2019. doi: <https://doi.org/10.3390/ijgi9010006>.
6. Wildemeersch, M. and Fortuny-Guasch, J. Radio Frequency Interference Impact Assessment on Global Navigation Satellite Systems. Ispra (VA), Italy. 2010. doi: 10.2788/6033.

Mustafaiev O.V. MODERN TECHNOLOGIES OF PROTECTION AGAINST GPS SPOOFING IN NAVIGATION SYSTEMS

In today's conditions of active use of unmanned aerial vehicles in various spheres of life, including military, civil aviation and maritime navigation, the issue of protection against threats related to GPS spoofing becomes especially relevant. GPS spoofing is a technology for creating and transmitting fake GPS signals in order to mislead receivers of navigation systems. Such attacks can have serious consequences, including loss of control of the UAV or deviation from the given route, which can lead to catastrophic events.

The article analyzes modern protection technologies against GPS spoofing, which are used to ensure the safety and reliability of navigation systems. In particular, the main approaches to detecting and preventing spoofing attacks are considered, such as signal strength analysis, the use of differential GPS (DGPS), multi-frequency and multi-system receivers, as well as signal authentication.

The prospects of using machine learning methods for analyzing GPS signals and detecting anomalies that may indicate spoofing attacks are highlighted separately. In particular, the use of neural networks to recognize fake signals is considered, which increases the effectiveness of protection and reduces the number of false alarms. Also considered is the integration of inertial navigation systems (INS) with GPS to detect inconsistencies between navigation data from different sources, allowing for autonomous navigation during an attack.

Despite the large number of available protection methods, none of them is absolutely reliable, which determines the need for further improvement of protection technologies. In particular, promising directions are the combination of several technologies at the same time, the use of quantum cryptography for the authentication of signals, as well as the development of global standards for the protection of navigation systems.

The article presents an analysis of current advances in GPS spoofing protection, highlighting the importance of continuous development of countermeasures, particularly in critical areas such as military operations, aviation, and autonomous vehicles. The conclusions of the work are aimed at the need to implement the latest technological solutions to ensure the reliability and safety of navigation systems in modern conditions.

Key words: navigation systems, satellite, GPS spoofing, interference signals, unmanned aerial vehicle, cyber security.

Соколов К.А.

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

Жук С.Я.

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

АДАПТИВНИЙ АЛГОРИТМ КОРЕЛЯЦІЙНОГО СТЕЖЕННЯ ЗА МАЛОРОЗМІРНИМ БПЛА

Стаття присвячена тематиці детектування та відслідковування об'єктів на відео з використанням кореляційного методу. В роботі розроблено адаптивний алгоритм стеження за маневруючим малорозмірним БПЛА, який використовує кореляційний метод виявлення, що дозволяє ефективно супроводити об'єкт при наявності некорельованого просторового шуму, і розрізнити різні види його руху. У статті розглянуто синтез адаптивних алгоритмів оцінювання параметрів руху об'єкту, використано математичний апарат змішаних марківських процесів в дискретному часі. У статті розкритий оптимальний алгоритм адаптивної фільтрації, який є рекурентним та описує еволюцію апостеріорної щільності ймовірності розширеного змішаного марківського процесу, що включає неперервнозначний вектор параметрів руху БПЛА та змінну перемикання, що характеризує вид його руху. Авторами показано що оптимальний пристрій, який реалізує алгоритм, є багатоканальним і відноситься до класу пристроїв із зворотними зв'язками між каналами. У роботі також наведений квазіоптимальний алгоритм адаптивної фільтрації отриманий методом гаусівської апроксимації умовних апостеріорних щільностей ймовірностей неперервного компонента. Розкрито, що оцінювання параметрів руху за осями системи координат матриці камери виконується адаптивними фільтрами третього порядку, які пов'язані між собою спільним блоком обрахунку апостеріорних ймовірностей типів руху об'єкту. Показано, що отриманий фільтр адаптується до динаміки руху БПЛА, що дозволяє підвищити точність прогнозування на ділянках майже рівномірного руху і зависання та формувати строби супроводу адекватно поточній ситуації. У статті продемонстровано, що виявлення об'єкту у стробі супроводу виконується способом порівняння глобального екстремуму нормованої взаємної кореляційної функції еталонного і поточного зображення із заданим пороговим значенням. Наведено викладки щодо невиявлення об'єкту та зазначені дії у випадку прийняття рішення про зрив супроводу. Аналіз розробленого адаптивного алгоритму кореляційного стеження було проведено шляхом статистичного моделювання. Авторами описана модель руху БПЛА, яка враховує три основних види руху: зависання, майже рівномірний рух, рух з маневром. Проаналізовано та наведено точносні характеристики прогнозування і оцінювання параметрів руху об'єкту, а також ймовірностей розпізнавання різних типів його руху. У заключенні роботи було розраховано ймовірності зриву та хибного супроводу об'єкту при різних відношеннях сигнал-шум.

Ключові слова: параметри руху, змішаний марківський процес, змінна перемикання, апостеріорна щільність ймовірності, оцінювання, прогнозування, взаємна кореляційна функція, строб супроводу, точносні характеристики, ймовірність зриву.

Постановка проблеми. Широке використання на практиці при супроводі рухомих розподілених об'єктів у широкопольних і вузькопольних системах відеоспостереження (СВ) знаходять методи, що засновані на алгоритмах кореляційного пошуку і калманівської фільтрації [1, 2].

Теоретичною підставою застосування кореляційного методу є його строга оптимальність для виявлення детермінованого сигналу у білому шумі із гаусівським розподілом яскравості [3]. Серед кіль-

кох різновидів на практиці найбільше поширення набув кореляційний алгоритм на основі нормованої взаємної кореляційної функції, який є нечутливим до відмінностей в загальній яскравості зображень [4]. Також реалізація кореляційного методу в спектральній області з використанням швидкого перетворення Фур'є дозволяє значно скоротити обчислювальні витрати при їх реалізації [5, 6].

Доповнення кореляційних алгоритмів стеження алгоритмом калманівської фільтрації дозволяє оці-

новати параметри руху об'єкту і забезпечувати більш точне прогнозування його положення на поточному кадрі [7]. Однак разом із зазначеними перевагами, фільтру Калмана притаманний і серйозний недолік, який отримав назву розбіжність, що проявляється в значному перевищенні дисперсії або математичного очікування фактичних помилок оцінювання відносно дисперсії помилок оцінювання, розрахованих фільтром [1]. Основними причинами розбіжності є неточність задачі моделі процесу, що підлягають фільтрації.

Сучасні малорозмірні БПЛА (МБПЛА) знайшли широке застосування в багатьох галузях [8, 9]. Вони є швидкісними об'єктами, які можуть виконувати рух з різними видами маневрів, що для спостерігача є невідомими [10, 11]. При відсутності повної апріорної інформації про модель руху об'єкта та рівняння спостереження, алгоритми траекторної фільтрації на основі фільтра Калмана часто є розбіжними.

Тому розробка більш досконалих алгоритмів адаптивного оцінювання параметрів руху маневруючого МБПЛА з використанням кореляційного методу співставлення зображень є актуальною задачею.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Загальні підходи до детектування та відслідковування об'єктів на послідовностях зображень наведені у роботах [10, 12, 13]. Детальний розгляд актуальних досліджень з використанням кореляційного підходу та синтезу фільтрів із застосуванням сучасних методів відображені у роботах [14–18]. Математичні викладки та формули подаються з використанням класичних фундаментальних робіт [1, 6, 19, 20]. Основні дослідження методів відслідковування малорозмірних об'єктів у складних умовах розглянуті у роботах [11, 21, 22]. Розрахунки моделювання та програмування алгоритмів у середовищі математичного моделювання та програмування MATLAB опираються на сучасні праці [23, 24, 24]. Дане дослідження є розвитком та доповненням ідей авторів викладених у працях [2, 7, 13, 25].

Постановка завдання. Метою статті є розробка адаптивного алгоритму кореляційного стеження за МБПЛА за даними СВ шляхом синтезу оптимального і квазіоптимального алгоритмів адаптивного оцінювання параметрів його руху

Виклад основного матеріалу. Математичні моделі руху маневруючого МБПЛА і спостереження

Першочерговим кроком при синтезі запропонованих алгоритмів є створення моделі спостере-

ження. На рис. 1 представлено об'єкт, як сукупність зв'язаних точок з центром «тяжіння» (χ, μ) в прямокутній системі координат (СК) матриці камери ХМ у пікселях. Тоді прямокутне вікно, в яку вписується об'єкт будемо вважати моделлю останнього. В кореляційних алгоритмах зразок об'єкту у прямокутному вікні називається еталонним зображенням. Еталон визначається на попередніх кроках роботи алгоритму стеження, що являє собою елемент навчання кореляційного алгоритму [16, 17].

До основних задач слідкування входить формування стробу, як ділянки у якій об'єкт знаходиться з високою імовірністю. Простір стробу є прямокутним вікном, розміри якого визначаються у відповідності до ймовірності потрапляння об'єкту в цю область. Центр стробу виставляється згідно з прогнозованою точкою положення об'єкту на поточному кадрі, що в свою чергу співпадає з координатами центру χ_e, μ_e , еталонного зображення (рис. 1).

Задля визначення зсуву зображення об'єкту відносно еталону застосовується кореляційний алгоритм. Проводиться розрахунок взаємної кореляційної функції еталона з фрагментом поточного зображення у стробі. Розташування глобального максимуму кореляційної функції характеризує зсув зображення об'єкту $(\Delta\chi_M, \Delta\mu_M)$ відносно еталону. Під дією впливу шуму, завад, фону, зміни розмірів та геометричної форми об'єкту зсув об'єкту $(\Delta\chi_M, \Delta\mu_M)$ визначається з певною похибкою [2].

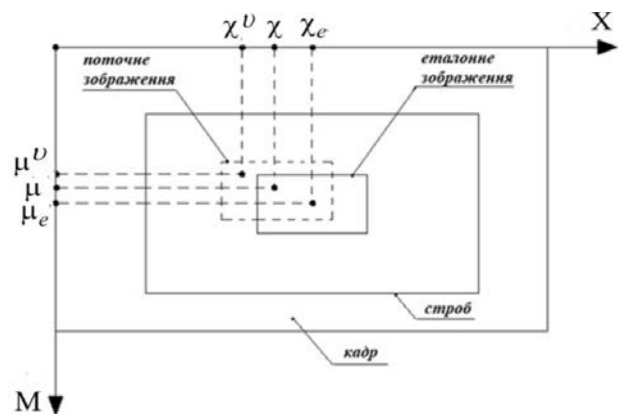


Рис. 1. Ілюстрація стробу, еталонного та поточного зображення

Розрахований зсув центру зображення об'єкту відносно центру стробу на k -му кроці описуються формулами:

$$\begin{aligned} \Delta\chi^v(k) &= \Delta\chi(k) + v_\chi(k); \\ \Delta\mu^v(k) &= \Delta\mu(k) + v_\mu(k), \end{aligned} \quad (1)$$

де $\Delta\chi^v(k)$, $\Delta\mu^v(k)$ – розраховані зсуви центру об’єкту відносно центру еталону на k -тому кроці; $\Delta\chi(k)$, $\Delta\mu(k)$ – істинні зсуви центру об’єкту спостереження відносно еталону на k -му кроці; $v_\chi(k)$, $v_\mu(k)$ – похибки вимірювання зсуву центру об’єкта відносно еталону на k -му кроці, котрі є гаусівськими з нульовим математичним очікуванням і кореляційною матрицею $\mathbf{R}(k)$.

Траєкторія маневруючого МБПЛА в СК матриці камери описується моделлю у вигляді дискретної стохастичної динамічної системи з випадковою структурою [1, 26]:

$$\mathbf{u}(k) = \mathbf{F}_j \mathbf{u}(k-1) + \mathbf{G}_j \dot{\mathbf{E}}(k), j = \overline{1, M}, \quad (2)$$

Остання включає три типи руху $M=3$: зависання $j=1$, майже рівномірний рух $j=2$, рух з маневром $j=3$; $\mathbf{u}^T(k) = (\chi(k), \dot{\chi}(k), \mu(k), \dot{\mu}(k))$ – вектор стану, до складу якого входять координати і швидкості зміни положення та прискорення по відповідних осях піксельної СК НМ; $\dot{\mathbf{E}}(k)$ – шум збудження з одиничною кореляційною матрицею. Матриці у складі моделі руху (2) мають вигляд [1].

$$\mathbf{F}_j = \begin{bmatrix} \mathbf{F}_j^b & 0 \\ 0 & \mathbf{F}_j^b \end{bmatrix}, \quad \mathbf{G}_j = \begin{bmatrix} \mathbf{G}_j^b & 0 \\ 0 & \mathbf{G}_j^b \end{bmatrix},$$

де $\mathbf{F}_j, \mathbf{G}_j, j = \overline{1, 3}$ наступні

$$\mathbf{F}_1 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}, \quad \mathbf{F}_2 = \begin{bmatrix} 1 & T & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}, \quad \mathbf{F}_3 = \begin{bmatrix} 1 & T & \frac{T^2}{2} \\ 0 & 1 & T \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix},$$

$$\mathbf{G}_1 = \begin{bmatrix} a_{1p} \cdot T \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}, \quad \mathbf{G}_2 = \begin{bmatrix} \frac{a_{2p} \cdot T^2}{2} \\ a_2 \cdot T \\ 0 \end{bmatrix}, \quad \mathbf{G}_3 = \begin{bmatrix} \frac{a_{3p} \cdot T^3}{6} \\ \frac{a_3 \cdot T^2}{2} \\ a_3 \cdot T \end{bmatrix};$$

a_{1p}, a_{2p}, a_{3p} – СКВ випадкових флуктуацій швидкості, прискорення і швидкості зміни прискорення МБПЛА для кожного типу руху, відповідно в системі координат матриці камери; T – темп надходження даних.

Типи структури моделі руху об’єкту (3.2), відповідно до певного виду маневру описується з використанням змінної перемикачання $a_j(k)$, $j = \overline{1, M}$. Остання відноситься до класу ланцюгів Маркова [26] із матрицею вірогідності переходів $\Pi_{ij}(k, k-1)$ та початковими вірогідностями $p_i(0), i, j = \overline{1, M}$, це дає можливість врахувати переходи між різними видами маневру об’єкту в випадкові моменти часу.

З врахуванням моделі руху (2), рівняння спостереження МБПЛА на поточному кадрі мають наступний вигляд:

$$\begin{aligned} \chi^v(k) &= \chi_e(k) + \chi^v(k) = \chi_e(k) + \chi(k) + v_\chi(k) = \chi(k) + v_\chi(k); \\ \mu^v(k) &= \mu_e(k) + \mu^v(k) = \mu_e(k) + \mu(k) + v_\mu(k) = \mu(k) + v_\mu(k), \end{aligned} \quad (3)$$

де $\chi^v(k)$, $\mu^v(k)$ – отримані координати об’єкта в прямокутній СК.

Перепишемо рівняння спостереження (3) у векторно-матричній формі:

$$\mathbf{u}^v(k) = \mathbf{H} \mathbf{u}(k) + \mathbf{v}(k), \quad (4)$$

де $\mathbf{u}^v(k) = (\chi^v(k), \mu^v(k))^T$ – вектор спостереження, що включає виміряні координати об’єкту в прямокутній СК; $\mathbf{v}_M(k) = (v_\chi(k), v_\mu(k))$ – вектор похибок вимірювання з кореляційною матрицею $\mathbf{R}(k)$, що має вигляд:

$$\mathbf{R}(k) = \begin{bmatrix} \sigma_\chi^2(k) & \sigma_{\chi\mu}^2(k) \\ \sigma_{\chi\mu}^2(k) & \sigma_\mu^2(k) \end{bmatrix};$$

\mathbf{H} – матриця спостереження, що має вигляд:

$$\mathbf{H} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \end{bmatrix}.$$

Тобто, задача оцінювання параметрів руху МБПЛА, який є розподіленим об’єктом, співставна до задачі оцінювання параметрів руху точкового об’єкту, де точкою є центр «тяжіння» прямокутного вікна, у яке вписаний об’єкт.

Розробка адаптивного алгоритму кореляційного стеження за малорозмірним БПЛА

З метою розробки адаптивного алгоритму кореляційного стеження за МБПЛА за даними СВ виконаємо синтез оптимального і квазіоптимального алгоритмів адаптивного оцінювання параметрів його руху.

Оптимальне вирішення задачі оцінювання, полягає у визначенні апостеріорної щільності ймовірності (ЩЙ) процесу, що підлягає оцінюванню. Щоб вирішити це завдання введемо до розгляду спільну апостеріорну ЩЙ $W(\mathbf{u}(k), a_j(k)) = P(\mathbf{u}(k), a_j(k) / \mathbf{U}_M(k))$, де $\mathbf{U}_M(k) = \mathbf{u}_M(k), \dots, \mathbf{u}_M(1)$ – послідовність вимірювань. При цьому розширений процес $(\mathbf{u}(k), a_j(k))$ відноситься до класу змішаних марківських процесів в дискретному часі [1, 26]. Використовуючи марківську властивість спільна апостеріорна ЩЙ $W(\mathbf{u}(k), a_j(k))$ розраховується рекурентно на основі рівняння:

$$W(\mathbf{u}(k), a_j(k)) = P(\mathbf{u}_M(k) / \mathbf{u}(k), a_j(k)) \times \sum_{i=1}^M \Pi_{ij}(k, k-1) \int_{-\infty}^{\infty} W(\mathbf{u}(k-1), a_i(k-1)) \times \quad (5)$$

$\times W(\mathbf{u}(k-1), a_i(k-1)) d\mathbf{u}(k-1) / P(\mathbf{u}_M(k) / \mathbf{U}_M(k-1))$, де $P(\mathbf{u}(k) / \mathbf{u}(k-1), a_j(k))$ – умовна щільність ймовірності, яка визначається на підставі рів-

няння (2); $P(\mathbf{u}_M(k) / \mathbf{u}(k), a_j(k))$ – однокрокова функція правдоподібності, що визначається на основі рівняння (4). Початкові умови мають вигляд: $W(\mathbf{u}(0), a_i(0)) = P(\mathbf{u}(0)) p_i(0), i = \overline{1, M}$.

Використовуючи теорему множення ймовірностей оптимальний алгоритм виразу (5), можна записати у вигляді системи рекурентних рівнянь [25]:

$$W_j^*(k) = \sum_{i=1}^M \pi_{ij}(k, k-1) W_i(k-1); \quad (6)$$

$$W_j^*(\mathbf{u}(k)) = \sum_{i=1}^M \pi_{ij}(k, k-1) W_i(k-1) \int_{-\infty}^{\infty} (\mathbf{u}(k) / \mathbf{u}(k-1), a_j(k)) \times \times W_i(\mathbf{u}(k-1)) d\mathbf{u}(k-1) / W_j^*(k); \quad (7)$$

$$W_j(\mathbf{u}(k)) = P(\mathbf{u}_M(k) / \mathbf{u}(k), a_j(k)) W_j^*(\mathbf{u}(k)) / / P(\mathbf{u}_M(k) / a_j(k), \mathbf{U}_M(k-1)); \quad (8)$$

$$W_j(k) = P(\mathbf{u}_M(k) / a_j(k), \mathbf{U}_M(k-1)) W_j^*(k) / / P(\mathbf{u}_M(k) / \mathbf{U}_M(k-1)), \quad (9)$$

де $W_j^*(\mathbf{u}(k)) = P(\mathbf{u}(k) / a_j(k), \mathbf{U}_M(k-1))$, $W_j(\mathbf{u}(k)) = P(\mathbf{u}(k) / a_j(k), \mathbf{U}_M(k))$ – умовні екстрапольована та апостеріона ЩЙ неперервного компоненту $\mathbf{u}(k)$ за умови $a_j(k)$; $W_j^*(k) = P(a_j(k) / \mathbf{U}_M(k-1))$, $W_j(k) = P(a_j(k) / \mathbf{U}_M(k))$ – екстрапольована та апостеріорна ймовірності дискретного компонента $a_j(k)$; $P(\mathbf{u}_M(k) / a_j(k), \mathbf{U}_M(k-1))$ – умовна ЩЙ, що визначається за допомогою формули:

$$P(\mathbf{u}_M(k) / a_j(k), \mathbf{U}_M(k-1)) = = \int P(\mathbf{u}_M(k) / \mathbf{u}(k), a_j(k)) W_j^*(\mathbf{u}(k));$$

де $P(\mathbf{u}_M(k) / \mathbf{U}_M(k-1))$ – умовна ЩЙ, яка обчислюється виразом:

$$P(\mathbf{u}_M(k) / \mathbf{U}_M(k-1)) = = \sum_{i=1}^M P(\mathbf{u}_M(k) / a_j(k), \mathbf{U}_M(k-1)) W_j^*(k)$$

Синтезований алгоритм оцінювання (6)–(9) є нелінійним. Рівняння (6), (9) використовується для розрахунку екстрапольованих $W_j^*(k)$ та апостеріорних $W_j(k)$ ймовірностей дискретного компонента $a_j(k)$. Рівняння (7), (8) використовуються для розрахунку умовних екстрапольованих $W_j^*(\mathbf{u}(k))$ та апостеріорних $W_j(\mathbf{u}(k))$ ЩЙ неперервного компонента $\mathbf{u}(k)$. Особливістю синтезованого алгоритму є неперервна зв'язаність рівнянь оцінювання та екстраполяції дискретного та неперервного компонентів між собою. Проте, інтегрування багатомірних щільностей ймовірності призводить до зростання обчислювальних витрат.

Для синтезу **квазіоптимального алгоритму** використаємо метод гаусівської апроксимації умовних апостеріорних щільностей ймовірностей $W_j^*(\mathbf{u}(k))$, $W_j(\mathbf{u}(k))$.

На практиці, нехтуючи взаємною кореляцією $\sigma_{\chi\mu}^2(k)$ помилок вимірювання $\nu_\chi(k)$, $\nu_\mu(k)$, яка часто є невідомою, можна не тільки спростити алгоритм, а також зменшити обчислювальні витрати. Виконавши заміну операцій над щільностями ймовірності в оптимальному алгоритмі оцінювання (6)–(9) на розрахунок їх математичних очікувань та кореляційних матриць, а також покладаючи взаємну кореляцією $\sigma_{\chi\mu}^2(k)$ рівною нулю, можна показати, що квазіоптимальний алгоритм оцінювання параметрів руху МБПЛА на послідовності зображень розбивається на складові. До них входять:

– оцінювання параметрів руху МБПЛА по осі X

$$\chi_j^*(k) = \sum_{i=1}^M \pi_{ij}(k, k-1) W_i(k-1) \mathbf{F}_j \hat{\chi}_i(k-1) / W_j^*(k); \quad (10)$$

$$\mathbf{P}_{\chi j}^*(k) = \sum_{i=1}^M \{ \mathbf{F}_j^b \hat{\mathbf{P}}_{\chi i}(k-1) \mathbf{F}_j^{bT} + \mathbf{G}_j^b \mathbf{G}_j^{bT}(k) + + (\mathbf{F}_j^b \hat{\chi}_i(k-1) - \chi_j^*(k)) (\mathbf{F}_j^b \hat{\chi}_i(k-1) - \chi_j^*(k))^T \} \times \times \pi_{ij}(k, k-1) W_i(k-1) / W_j^*(k)$$

$$\hat{\chi}_j(k) = \chi_j^*(k) + \mathbf{K}_{\chi j}(k) (\chi_M(k) - \mathbf{H} \chi_j^*(k)); \quad (12)$$

$$\mathbf{K}_{\chi j}(k) = \mathbf{P}_{\chi j}^*(k) \mathbf{H}^{bT} (\mathbf{H}^b \mathbf{P}_{\chi j}^*(k) \mathbf{H}^{bT} + \sigma_{\chi}^2(k))^{-1}; \quad (13)$$

$$\hat{\mathbf{P}}_{\chi j}(k) = \mathbf{P}_{\chi j}^*(k) - \mathbf{K}_{\chi j}(k) \mathbf{H}^b \mathbf{P}_{\chi j}^*(k) \quad (14)$$

де $\chi_j^*(k)$, $\hat{\chi}_j(k)$, $\mathbf{P}_{\chi j}^*(k)$, $\hat{\mathbf{P}}_{\chi j}(k)$ – математичні очікування та кореляційні матриці умовних екстрапольованих $W_j^*(\zeta(k))$ та апостеріорної $W_j(\zeta(k))$ щільності ймовірності $j = \overline{1, M}$; $\mathbf{K}_{\chi j}(k)$ – коефіцієнт посилення j -го каналу квазіоптимального пристрою $j = \overline{1, M}$; $\zeta(k) = (\chi(k), \dot{\chi}(k), \chi(k))^T$ – вектор стану, що включає координати положення, швидкості зміни положення і прискорення по осі X; $\mathbf{H}^b = [1 \ 0 \ 0]$ – відомий вектор-рядок.

– Оцінювання параметрів руху МБПЛА по осі M

$$\mu_j^*(k) = \sum_{i=1}^M \pi_{ij}(k, k-1) W_i(k-1) \mathbf{F}_j^b \hat{\mu}_i(k-1) / W_j^*(k); \quad (15)$$

$$\mathbf{P}_{\mu j}^*(k) = \sum_{i=1}^M \{ \mathbf{F}_j^b \hat{\mathbf{P}}_{\mu i}(k-1) \mathbf{F}_j^{bT} + \mathbf{G}_j^b \mathbf{G}_j^{bT}(k) + + (\mathbf{F}_j^b \hat{\mu}_i(k-1) - \mu_j^*(k)) (\mathbf{F}_j^b \hat{\mu}_i(k-1) - \mu_j^*(k))^T \} \times \times \pi_{ij}(k, k-1) W_i(k-1) / W_j^*(k)$$

$$\hat{\mu}_j(k) = \mu_j^*(k) + \mathbf{K}_{\mu j}(k) (\mu_M(k) - \mathbf{H} \mu_j^*(k)); \quad (17)$$

$$\mathbf{K}_{\mu j}(k) = \mathbf{P}_{\mu j}^*(k) \mathbf{H}^{bT} (\mathbf{H}^b \mathbf{P}_{\mu j}^*(k) \mathbf{H}^{bT} + \sigma_{\mu}^2(k))^{-1}; \quad (18)$$

$$\hat{\mathbf{P}}_{\mu j}(k) = \mathbf{P}_{\mu j}^*(k) - \mathbf{K}_{\mu j}(k) \mathbf{H}^b \mathbf{P}_{\mu j}^*(k) \quad (19)$$

де $\mu_j^*(k)$, $\hat{\mu}_j(k)$, $\mathbf{P}_{\mu j}^*(k)$, $\hat{\mathbf{P}}_{\mu j}(k)$ – математичні очікування та кореляційні матриці умовних екстрапольованих $W_j^*(\mu(k))$ та апостеріорної $W_j(\mu(k))$ щільності ймовірності $j = \overline{1, M}$; $\mathbf{K}_{\mu j}(k)$ – коефіцієнт посилення j -го каналу квазіоптимального пристрою $j = \overline{1, M}$; $\mu(k) = (\mu(k), \dot{\mu}(k), \mu(k))^T$ – вектор стану, що включає координати положення, швидкості зміни положення і прискорення по осі M.

– Розрахунок апостеріорних ймовірностей типів руху об’єкта

$$W_j^*(k) = \sum_{i=1}^M \gamma_{ij}(k, k-1) W_i(k-1); \quad (20)$$

$$W_j(k) = P(\mathbf{u}^v / a_j(k), \mathbf{z}(k-1)) W_j^*(k) / P(\mathbf{z}(k) / \mathbf{z}(k-1)), \quad (21)$$

де $P(\mathbf{u}^v(k) / a_j(k), \mathbf{z}(k-1)) =$

$$= P(\chi^v(k) / a_j(k), U_\chi^v(k-1)) P(\mu^v(k) / a_j(k), U_\mu^v(k-1))$$

– є добутком гаусівських щільностей ймовірності

$$P(\chi_M(k) / a_j(k), \Xi_\chi(k-1)) =$$

$$= N(\mathbf{H}^b \boldsymbol{\zeta}^*(k), D_{\chi^v}(k)), P(\mu_M(k) / a_j(k), \Xi_\mu(k-1)) =$$

$N(\mathbf{H}^b \boldsymbol{\zeta}_M^*(k), D_{\mu^v}(k)); D_{\chi^v}(k), D_{\mu^v}(k)$ – визначаються за формулами:

$$D_{\chi^v}(k) = \mathbf{H}^b \mathbf{P}_{\chi^v}^*(k) \mathbf{H}^{bT} + \sigma_\chi^2(k); \quad (22)$$

$$D_{\mu^v}(k) = \mathbf{H}^b \mathbf{P}_{\mu^v}^*(k) \mathbf{H}^{bT} + \sigma_\mu^2(k). \quad (23)$$

Отже, адаптивний фільтр складається з двох адаптивних фільтрів третього порядку, які мають спільний блок розрахунку апостеріорних ймовірностей типів руху об’єкта.

Отриманий квазіоптимальний адаптивний алгоритм оцінювання дає можливість виконати оптимізацію розмірів стробів супроводу на базі отриманих оцінок змінної перемикачання $a_j(k)$. Зрозуміло, що у випадку збільшення розмірів строба ймовірність зриву супроводу маневруючого об’єкта зменшується, але при цьому підвищується ймовірність потрапляння в строб інших об’єктів, що може призвести до зриву стеження [1]. Поточний строб визначається з огляду на характеристики помилок екстраполяції, розрахованих для моделі руху об’єкта $l = \bar{1}, \bar{M}$, екстрапольована ймовірність якої є максимальною. Координати центру строба збігаються з екстрапольованим положенням центра «тяжіння» об’єкта на поточному кроці (24).

$$\begin{aligned} \chi_e(k) &= \chi_l^*(k); \\ \mu_e(k) &= \mu_l^*(k). \end{aligned} \quad (24)$$

Границі стробу залежать від лінійних розмірів еталону і помилок екстраполяції та позиціонування МБПЛА

$$\begin{aligned} S_{\chi^l}(k) &= \Delta_{\chi^e}(k) + 2\gamma_1 \sqrt{D_{\chi^l}(k)}; \\ S_{\mu^l}(k) &= \Delta_{\mu^e}(k) + 2\gamma_1 \sqrt{D_{\mu^l}(k)}, \end{aligned} \quad (25)$$

де $\Delta_{\chi^e}(k), \Delta_{\mu^e}(k)$ – лінійні розміри еталону на k -му кроці; $D_{\chi^l}(k), D_{\mu^l}(k)$ – дисперсії нев’язок, які розраховуються по формулам (22), (23); γ_1 – коефіцієнт, який регулює ймовірність потрапляння зображення МБПЛА в строб.

Розуміння про відсутність об’єкта у стробі супроводу відбувається шляхом порівняння гло-

бального екстремуму нормованої взаємної кореляційної функції R_{max} із заданим порогом h_R :

$$R_{max} \geq h_R, \quad (26)$$

За невиконання умови (26) приймається рішення про відсутність об’єкта в стробі супроводу. Тоді розраховуються характеристики грубого стробу за формулами, аналогічними (25), в яких тип руху покладається $l = 3$ і використовується коефіцієнт $\gamma_2 > \gamma_1$. Потім проводиться повторний пошук об’єкта. Якщо об’єкт знаходиться в грубому стробі, то проводиться оцінювання його координат. При відсутності об’єкта в грубому стробі оцінювання не відбувається, і в якості апостеріорних використовуються екстрапольовані характеристики руху об’єкта і ймовірності типів руху. Додатково формується ознака невиявлення об’єкта на поточному кадрі. Рішення про зрив стеження приймається після невиявлення об’єкта m_c разів поспіль в останніх ітераціях.

Аналіз адаптивного алгоритму кореляційного стеження шляхом статистичного моделювання

Аналіз розробленого алгоритму стеження виконаний з використанням середовища MATLAB. Траєкторія руху побудована МБПЛА в СК камери $X_c Y_c Z_c$. Формування траєкторій МБПЛА здійснювалось на основі моделі подібної до (2), з трьома основними видами руху. Кожна тестова траєкторія була розбита на сім інтервалів з певним типом руху, дані наведені в таблиці 1.

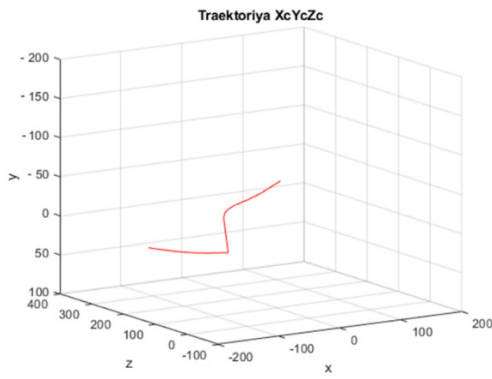
Таблиця 1

Будова тестової траєкторії

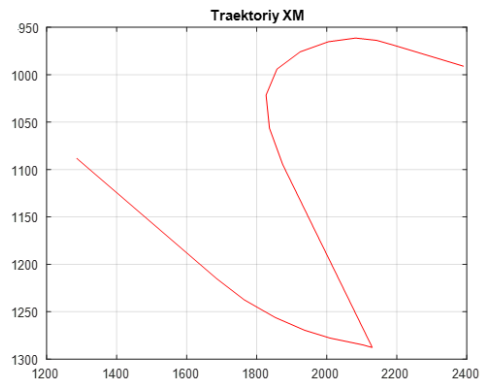
Інтервал	Такти	Тип руху	Індекс типу руху
I	$1 \leq k \leq 8$	рівномірний рух	$j = 2$
II	$9 \leq k \leq 14$	маневр	$j = 3$
III	$15 \leq k \leq 19$	рівномірний рух	$j = 2$
IV	$20 \leq k \leq 24$	маневр «скидання швидкості»	$j = 3$
V	$25 \leq k \leq 32$	зависання	$j = 1$
VI	$33 \leq k \leq 38$	маневр	$j = 3$
VII	$39 \leq k \leq 45$	рівномірний рух	$j = 2$

Початкові параметри руху МБПЛА: $x_c(-1) = 110$ м, $\dot{x}_w(-1) = -20$ м/с, $\dot{x}_c(-1) = 0$ м/с², $y_c(-1) = -25$ м, $\dot{y}_c(-1) = 0$ м/с, $\dot{y}_c(-1) = 0$ м/с², $z_c(-1) = 300$ м, $\dot{z}_c(-1) = -20$ м/с, $\dot{z}_c(-1) = 0$ м/с². Темп формування траєкторії МБПЛА $T = 0.3$ с.

Після визначення координат положення в СК камери розраховується його проекції в піксельній СК матриці камери, яка визначає координати точки в піксельних одиницях вимірювання.



а



б

Рис. 2. Траєкторія руху МБПЛА в різних системах координат

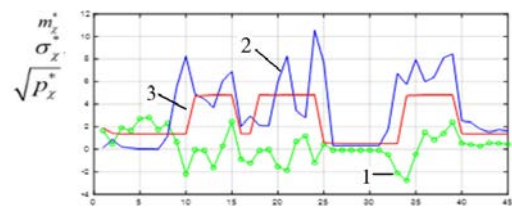
Розмір матриці камери 36мм на 24 мм. Роздільна здатність камери 4К. Фокусна відстань $f = 12$ мм. Типову тестову траєкторію руху МБПЛА в СК камери XM показано на рис. 2, б.

Було встановлено оцінювання СКВ шумів збудження для різних типів руху МБПЛА: $a_1 = 1$ пікс./такт; $a_2 = 10$ пікс./с²; $a_3 = 60$ пікс./с³. Кореляційним методом встановлені помилки вимірювання прямокутних координат об'єкту $\sigma_x = \sigma_y = 0.7$ пікс. Кількість реалізацій метода Монте-Карло дорівнює 100.

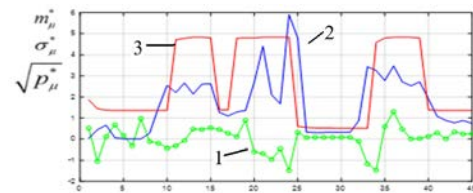
На рис. 3 (а, б) показані мат. очікування m_x^*, m_y^* (криві-1) і СКВ σ_x^*, σ_y^* (криві-2) помилок прогнозу положення об'єкту, що визначені методом Монте-Карло та СКВ помилок прогнозу $\sqrt{p_x^*}, \sqrt{p_y^*}$ (криві-3) положення об'єкту, які обчислені фільтром. Математичне очікування реальних похибок оцінювання добре корегується з СКВ похибок оцінювання, розрахованими фільтром, що свідчить про коректну роботу алгоритму. На ділянках прямолінійного рівномірного руху МБПЛА СКВ похибок прогнозу його координат в 3.2 рази менше, ніж на ділянках руху з маневром. На ділянках зависання МБПЛА можна досягти підвищення точності прогнозування його положення в 2 рази. Це дозволяє формувати строби супроводу адекватно поточній ситуації.

На рис. 4 (а, б) показані математичні очікування \hat{m}_x, \hat{m}_y (криві-1) і $\hat{\sigma}_x, \hat{\sigma}_y$ (криві-2) помилок оцінки положення об'єкту, котрі визначені методом Монте-Карло, та СКВ помилок оцінки $\sqrt{\hat{p}_x}, \sqrt{\hat{p}_y}$ (криві-3) положення об'єкту, які обчислені фільтром. Фактичні та розраховані фільтром СКО помилок оцінок узгоджені між собою, що свідчить про адекватну роботу алгоритму.

На рис. 5 показані ймовірності p_{m1} (крива-1), p_{m2} (крива-2), p_{m3} (крива-3) розпізнавання адаптивним алгоритмом різних типів руху МБПЛА: зависання, майже рівномірний рух, рух з манев-

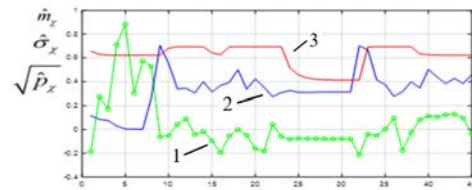


а

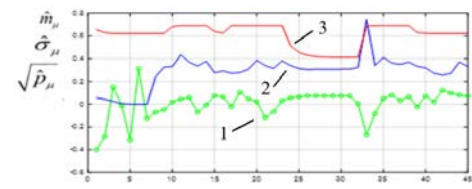


б

Рис. 3. Графіки математичних очікувань і СКВ помилок оцінки положення МБПЛА, розрахованих адаптивним алгоритмом



а)



б)

Рис. 4. Графіки математичних очікувань і СКВ помилок прогнозу положення МБПЛА, розраховані адаптивним алгоритмом

ром. Адаптивний алгоритм забезпечує розпізнавання першого і другого типів руху МБПЛА з ймовірностями не нижче 0.9.

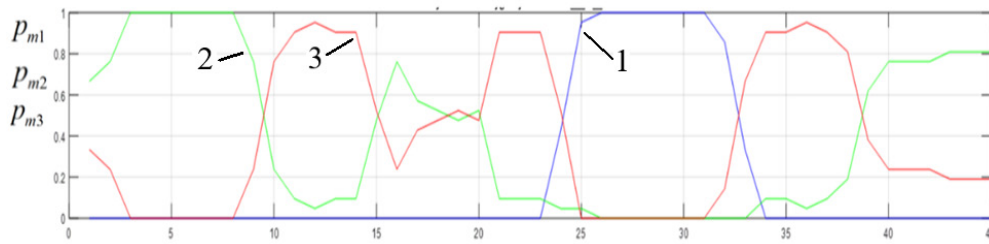


Рис. 5. Ймовірності розпізнавання адаптивним алгоритмом різних видів руху МБПЛА

Ймовірності зриву стеження МБПЛА p_z , ймовірності хибного супроводу МБПЛА p_{xc} , математичні очікування m_i і СКВ σ_i кількості тактів істинного супроводу МБПЛА при різних значеннях СКВ похибки шуму σ_n для тестового зображення МБПЛА розміром 10 на 6 пікселів представлені в таблиці 2. Дані обчислені за допомогою методу Монте-Карло.

Зрив супроводу визначається алгоритмом за умови, що коефіцієнт взаємної кореляції приймає значення менше порогового рівня протягом трьох тактового періоду. Прийняття рішення про хибний супровід визначається, якщо справджується умова виходу тестового зображення за межі строби супроводу на інтервалі з трьох послідовних тактів. У процесі розрахунку математичного очікування m_i і СКВ σ_i приймається до уваги винятково час істинного супроводу МБПЛА. Було проведено 100 експериментів.

При значеннях $\sigma_n = 0.1$ ($h^2 = 24$ дБ) розроблений алгоритм реалізує низьку ймовірність зриву супроводу МБПЛА. При значеннях $\sigma_n > 0.2$ ($h^2 = 18$ дБ) зростає ймовірність хибного супроводу об'єкту p_{xc} . Причиною останнього явища є зменшення максимуму взаємної кореляційної функції зашумлених еталону і поточного зображень. Як наслідок, алгоритм виконує захоплення хибних максимумів взаємної кореляційної функції, які створені завадою і слідкує за ними. При $\sigma_n = 0.3$ ($h^2 = 14$ дБ) супровід тестового зображення пікселів стає неможливим.

Висновки. Для визначення координат маневруючого МБПЛА на поточному кадрі використано метод кореляційного порівняння поточного зображення з еталоном в рамках синтезу квазіоптимального алгоритму адаптивного оцінювання параметрів руху. За обома осями СК матриці камери виконується оцінювання параметрів руху адаптивними фільтрами третього порядку, які пов'язані між собою спільним блоком обрахунку апостеріорних ймовірностей типів руху об'єкту. Виявлення об'єкту у стробі супроводу виконується способом порівняння глобального екстремуму нормованої взаємної кореляційної функції із заданим пороговим значенням. У випадку невиявленні об'єкту відбувається його повторний пошук у грубому стробі, сформованому виходячи із гіпотези руху з маневром.

Кореляційний метод реалізує субпіксельну точність визначення координат МБПЛА на зображенні з фоновим некорельованим гаусівським шумом. СКВ похибки позиціонування при зниженні вихідного ВСШ менше, ніж 16 дБ показує суттєвий зріст. Зашумленість зображення призводить до зменшення коефіцієнту кореляції зображень нижче, ніж 0.4, а також породжує додаткові локальні екстремуми. Як наслідок, розмір зображення (енергії сигнальної складової) є одним з вирішальних факторів, що, у цілому, суттєво впливає на точність і ефективність супроводу МБПЛА.

Розроблений квазіоптимальний алгоритм адаптивного оцінювання з ймовірностями не нижче 0.9 забезпечує розпізнавання зависання і майже рівномірний рух МБПЛА, що дозволяє будувати строби супроводу адекватно поточній ситуації. На ділянках прямолінійного рівномірного руху і зависання МБПЛА СКВ похибок прогнозу його координат в 3.2 і 6.5 разів менше, ніж на ділянках руху з маневром. У свою чергу це дає можливість знизити ймовірність потрапляння в строб сторонніх об'єктів.

Таблиця 2

Ймовірності зриву супроводження МБПЛА

σ_n	0.01	0.05	0.1	0.2	0.3
p_z	0.033	0.067	0.067	0	0
p_{xc}	0	0	0.067	0.17	1
m_i	44.6	42.1	42.1	37.71	4.81
σ_i	1.81	4.6	8.3	10.4	3.1

Також вищезазначений алгоритм реалізує низьку ймовірність зриву супроводу МБПЛА при вихідному ВСШ більше, ніж 18 дБ, що, відповідає практичним ситуаціям при супроводі розподіленого об'єкту. За умови, що ВСШ приймає зна-

чення менше, ніж 14 дБ, стеження за МБПЛА стає неможливим, що пов'язано зі зменшенням коефіцієнту взаємної кореляції зображень і появою рівновеликих хибних максимумів кореляційної функції, за якими і відбувається хибне стеження.

Список літератури:

1. Жук С. Я., Товкач І. О. Методи адаптивного оцінювання параметрів руху безпілотного літального апарату на основі вимірювань сенсорної мережі : монографія. Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, Вид-во "Політехніка", 2019.
2. Herasymenko A. O., Zhuk S. Y. Analysis of the Efficiency of the Kalman-Type Correlation Algorithm for Tracking of a Small UAV in the Presence of Uncorrelated Interference. *Visnyk NTUU KPI Seria - Radiotekhnika Radioaparotobuduvannia*. 2021. No. 87. P. 22–29. URL: <https://doi.org/10.20535/RADAP.2021.87.22-29>.
3. Visual object tracking using adaptive correlation filters. D. Bolme et al. 2010 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR), San Francisco, CA, USA, 13–18 June 2010. 2010. URL: <https://doi.org/10.1109/cvpr.2010.5539960>.
4. Ravichandran G., Casasent D. Minimum noise and correlation energy optical correlation filter. *Applied Optics*. 1992. Vol. 31, no. 11. P. 1823. URL: <https://doi.org/10.1364/ao.31.001823>.
5. Blackman S., Popoli R. Design and Analysis of Modern Tracking Systems (Artech House Radar Library). Artech House Publishers, 1999. 1230 p.
6. Szeliski R. *Computer Vision: Algorithms and Applications*. Springer London, 2010. 555 p.
7. Жук С. Я., Герасименко А. О., Соколов К. А. Аналіз точносних характеристик кореляційно-екстремального алгоритму стеження за малорозмірним БПЛА з використанням фільтру Калмана. «Перспективи телекомунікацій - 2021» : матеріали Міжнар. науково-техн. конф., м. Київ, 12–16 квіт. 2021 р. Київ, 2021. С. 292–294.
8. Integrated UAV and Satellite Multi-Spectral for Agricultural Drought Monitoring of Winter Wheat in the Seedling Stage. X. Yang et al. *Sensors*. 2024. Vol. 24, no. 17. P. 5715. URL: <https://doi.org/10.3390/s24175715>.
9. Recognition of Urbanized Areas in UAV-Derived Very-High-Resolution Visible-Light Imagery. E. Puniach et al. *Remote Sensing*. 2024. Vol. 16, no. 18. P. 3444. URL: <https://doi.org/10.3390/rs16183444>.
10. Advances and Challenges in Drone Detection and Classification Techniques: A State-of-the-Art Review. U. Seidaliyeva et al. *Sensors*. 2023. Vol. 24, no. 1. P. 125. URL: <https://doi.org/10.3390/s24010125>.
11. Деденок В., Саваневич В. Ієрархічний метод виявлення малорозмірного об'єкта, що рухається. Системи озброєння і військова техніка. 2005. № 1. С. 40–45.
12. Варфоломєєв А. Ю. Методи та алгоритми автоматичного відслідковування об'єктів на відеопослідовностях: монографія / ред. О. І. Антонюк. Київ : КІМ, 2013. 112 с.
13. Соколов К. Візуальне виявлення та відстеження малогабаритних рухомих об'єктів на основі функціональних особливостей зорового апарату та особливостей сприйняття людини. *Вчені записки ТНУ імені В.І. Вернадського. Серія: Технічні науки*. 2023. № 5. С. 75–82. URL: <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2023.5/13>.
14. High-Speed Tracking with Kernelized Correlation Filters. J. F. Henriques et al. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*. 2015. Vol. 37, no. 3. P. 583–596. URL: <https://doi.org/10.1109/tpami.2014.2345390>.
15. Learning Aberrance Repressed Correlation Filters for Real-Time UAV Tracking. Z. Huang et al. 2019 IEEE/CVF International Conference on Computer Vision (ICCV), Seoul, Korea (South), 27 October – 2 November 2019. 2019. URL: <https://doi.org/10.1109/iccv.2019.00298>.
16. Learning Support Correlation Filters for Visual Tracking. W. Zuo et al. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*. 2019. Vol. 41, no. 5. P. 1158–1172. URL: <https://doi.org/10.1109/tpami.2018.2829180>.
17. Long-term correlation tracking. C. Ma et al. 2015 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR), Boston, MA, USA, 7–12 June 2015. 2015. URL: <https://doi.org/10.1109/cvpr.2015.7299177>.
18. Long-term target tracking combined with re-detection. J. Wang et al. *EURASIP Journal on Advances in Signal Processing*. 2021. Vol. 2021, no. 1. URL: <https://doi.org/10.1186/s13634-020-00713-3>.
19. Kaehler A., Bradski G. *Learning OpenCV: Computer Vision with the OpenCV Library*. O'Reilly Media, Incorporated, 2008. 555 p.
20. Васильєв В. М., Жук С. Я. Теорія ймовірностей в радіотехніці : підручник. Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, Вид-во «Політехніка», 2023. 362 с.
21. Liu D., Zhang J., Dong W. Temporal Profile Based Small Moving Target Detection Algorithm in Infrared Image Sequences. *International Journal of Infrared and Millimeter Waves*. 2007. Vol. 28, no. 5. P. 373–381. URL: <https://doi.org/10.1007/s10762-007-9214-z>.

22. Hadzagic M., Michalska H., Lefebvre E. Track-Before Detect Methods in Tracking Low-Observable Targets: A Survey. *Sensor Trans. Mag.* 2005. Vol. 54. P. 374–380.
23. Davis T. A. *MATLAB Primer*. Taylor & Francis Group, 2010. 232 p.
24. Єгоршин О. О., Малярець Л. М., Сінкевич Б. В. Довідник з математичної статистики з прикладами обчислень у MatLab : навч.-практ. посіб. ч. 2. Харків : ХНЕУ, 2009. 508 с.
25. Жук С. Я., Соколов К. А. Адаптивне оцінювання параметрів руху малорозмірного БПЛА за даними відеокамери і FMCW-далекоміру. *Вісник НТУУ «КПІ»*. Серія Радіотехніка, Радіоапаратобудування. 2023. № 91. С. 46–52. URL: <https://doi.org/10.20535/RADAP.2023.91.46-52>.
26. Zhuk S. Y. Estimation of Stochastic Processes with Random Structure and Markov Switches in Discrete Time (Review). *Radioelectronics and Communications Systems*. 2020. Vol. 63, no. 10. P. 505–520. URL: <https://doi.org/10.3103/s0735272720100015>.

Sokolov K.A., Zhuk S.Ya. ADAPTIVE CORRELATION ALGORITHM FOR TRACKING SMALL UAVS

The article is dedicated to the detection and tracking of objects in video using a correlation-based method. It presents the development of an adaptive tracking algorithm for maneuvering small-sized unmanned aerial vehicles (UAVs), which employs a correlation detection method that effectively tracks the object in the presence of uncorrelated spatial noise and distinguishes 9 between different types of motion. The synthesis of adaptive algorithms for motion parameter estimation is considered, utilizing the mathematical framework of mixed Markov processes in discrete time. The paper introduces an optimal adaptive filtering algorithm, which is recursive and describes the evolution of the posterior probability density of an extended mixed Markov process. This process includes a continuous-valued vector of UAV motion parameters and a switching variable characterizing the type of motion. The authors demonstrate that the optimal device implementing the algorithm is multi-channel and belongs to the class of systems with feedback between channels. A quasi-optimal adaptive filtering algorithm is also presented, derived using Gaussian approximation for the conditional posterior probability densities of the continuous component. It is shown that motion parameter estimation along the axes of the camera coordinate system is performed by third-order adaptive filters, which are interconnected through a shared block that computes posterior probabilities for the object's motion types. The developed filter adapts to the UAV's motion dynamics, improving prediction accuracy during near-uniform motion and hovering, and forming tracking gates that are adequate to the current situation. The paper demonstrates that object detection within the tracking gate is performed by comparing the global extremum of the normalized cross-correlation function of the reference and current images with a predefined threshold. The steps for handling non-detection and the actions taken in the event of a tracking failure are also described. The developed adaptive correlation tracking algorithm is analyzed through statistical modeling. The UAV motion model incorporates three primary types of motion: hovering, near-uniform motion, and maneuvering. The paper presents an analysis of the accuracy characteristics of motion parameter prediction and estimation, as well as the probabilities of recognizing different motion types. Finally, probabilities of tracking failure and false tracking under various signal-to-noise ratios are calculated.

Key words: UAV motion parameters, mixed Markov process, switching variable, posterior probability density, estimation, prediction, cross-correlation function, tracking gate, accuracy characteristics, tracking failure probability.

УДК 621.391

DOI <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2024.5.1/12>**Сушин І.О.**Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»**Лисенко О.І.**Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

ОЦІНКА ЕФЕКТИВНОСТІ МЕТОДУ ПІДТРИМКИ ЗВ'ЯЗНОСТІ МОБІЛЬНОЇ МЕРЕЖІ СЕНСОРІВ СПРЯМОВАНОЇ ДІЇ ІЗ ВИКОРИСТАННЯМ ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙНИХ АЕРОПЛАТФОРМ РІЗНОРІВНЕВОГО РОЗТАШУВАННЯ

Досліджено, що мобільні сенсорні мережі являють собою вагому частину безпроводових сенсорних мереж в цілому. Відбуваються процеси їх постійного вдосконалення, такі як використання сенсорів спрямованої дії, застосування двох і більше рівнів телекомунікаційних аероплатформ тощо. Використання ефективних методів, які дозволятимуть покращити показники мережі є ключовим аспектом. Це створює наукову задачу, яка полягає у розробці методики оцінки ефективності методу підтримки зв'язності мобільної мережі сенсорів спрямованої дії за допомогою телекомунікаційних аероплатформ різнорівневого розташування.

У статті розглянуто перелік можливих параметрів, які будуть обрані для виконання порівняння, сформовано необхідні вхідні дані для проведення імітаційного моделювання. Також наведено структуру мобільних сенсорних мереж із використанням телекомунікаційних аероплатформ (БПЛА) на основі яких побудовано математичні моделі. А саме мобільна мережа сенсорів всеспрямованої дії з використанням одного рівня БПЛА та мобільна мережа сенсорів спрямованої дії із використанням двох рівнів БПЛА. На нижчому рівні знаходяться БПЛА з меншими енергетичними можливостями (зазвичай гелікоптерного типу), а на верхньому – з більшим (зазвичай літакового типу). В обох випадках інформація передається до псевдосупутника, який має зв'язок із класичними мережами зв'язку.

За допомогою програмного середовища Matlab виконано розрахунки середньої довжини маршруту, затримки, кількості БПЛА апаратів на шляху від вузла до псевдосупутника, їх медіани та моди, а також середньої пропускної здатності. Тренд залежності пропускної здатності від відстані збігається із раніше проведеними розрахунками у програмному комплексі Atoll. Отримані результати підтверджують актуальність та можливість використання мобільної мережі сенсорів спрямованої дії із використанням багаторівневих телекомунікаційних аероплатформ у подальших наукових та виробничих цілях.

Ключові слова: МСМ, телекомунікаційна аероплатформа, сенсори спрямованої дії, сенсори всеспрямованої дії, БПЛА.

Постановка проблеми. Мобільні сенсорні мережі (МСМ) з кожним роком займають все більш вагому частину безпроводових мереж у зв'язку зі збільшенням кількості воєнних конфліктів, катаклізмів різного характеру тощо. Їх можна характеризувати як розподілену систему безпроводних вузлів (малого розміру) здатну самоорганізуватися. Основними якостями МСМ з використанням телекомунікаційних аероплатформ (ТА) є можливість моніторингу різноманітних параметрів, обміну інформації на великих територіях по маршрутах, що проходять через інші вузли і БПЛА до найближчого мережевого

елемента (МЕ) (наприклад, супутник чи базова станція) систем загального користування чи безпосередньо до центру обробки інформації. Тому їх розвиток є актуальним, в тому числі із використанням ТА, а саме організації та покращення зв'язності між МЕ.

У класичних МСМ із використанням ТА сенсорні вузли мають всеспрямовану дію (використовують відповідний тип антен), а безпілотні літальні апарати (БПЛА) розташовуються на одному рівні [1, 2], але не завжди це дозволяє досягнути потрібної пропускної здатності чи внести обмеження довжини маршруту від сенсора

(вузла) до супутника чи базової станції та інших параметрів. Також важливим є ефективне використання наявного обмеженого ресурсу БПЛА. Тому варто розглянути мобільну мережу сенсорів спрямованої дії [3, 4] із застосуванням ТА різномірного розташування [5, 6], що дозволить покращити ключові параметри.

Для оцінки ефективності наземно-повітряної мережі (НПМ) важливо визначити перелік параметрів: час розгортання, функціонування, кількість необхідних ТА, відсоток покриття, пропускна здатність, затримка тощо, а також вхідних параметрів: площа покриття, характеристики приймально-передавального обладнання, детальний опис топології тощо. Виходячи з цього виникає потреба у формуванні методики оцінки ефективності НПМ.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Класична топологія НПМ мережі полягає у використанні вузлів всеспрямованої дії на нульовому рівні та БПЛА, які розташовуються на одному рівні. Існуючі праці показують, що їх вдосконалення полягає у впровадженні нових алгоритмів кластеризації, обльоту та позиціонування [7–9]. У МСМ такого типу вузли дозволяють приймати та передавати сигнал у всіх напрямках, що дозволяє їх використовувати у сценаріях швидко змінних подій і переміщення у просторі, проте в такому випадку ефективність споживання енергії лишається низькою або виникають обмеження у максимальній відстані лінії зв'язку або пропускній здатності [3, 4]. Також використання одного рівня БПЛА вимагає більшої їх кількості, що не завжди є можливим. Тому для усунення вищевказаних недоліків були запропоновані МСМ з вузлами спрямованої дії із використанням двох та більше рівнів БПЛА [5, 6], які дозволяють використовувати вже наявні вдосконалення алгоритмів із різними протоколами доступу. Але і досі існує необхідність у їх оцінці і порівнянні для прийняття рішення про подальше впровадження у подальших наукових та виробничих цілях.

Постановка завдання. Наукові дослідження та розробки, які забезпечують покращення зв'язності мережевих елементів НПМ являють собою вагомий напрямок у їх розвитку із подальшим впровадженням у цивільних та військових сферах.

Далі постає задача формування можливих параметрів оцінки їх ефективності та відповідної методики. Тому необхідно виходячи з існуючих досліджень та методів [1–2, 7–10] провести порівняння із запропонованою мобільною мережею сенсорів спрямованої дії з використанням ТА різномірного розташування. Для цього потрібно

створити математичні моделі із задалегідь обраними вхідними даними, що дозволять провести експеримент (імітаційне моделювання) та зробити висновки.

Виклад основного матеріалу. Важливо розуміти, що оцінка ефективності може здійснюватися пофазно: під час оперативного керування, зміни конфігурації (нарощування або зменшення), планування або розгортання. На виконання кожної фази відводиться необхідний час $T_{\text{необх}}$ (задається часове обмеження), а ефективність визначається згідно правила $T_{\text{необх}} \rightarrow \min$ або $T \leq T_{\text{необх}}$, якістю прийнятих рішень центром керування мережі (ЦКМ), затратними ресурсами (вузли, ТА) та енерговитратами. Робота системи керування складається з наступних підсистем: планування та оптимізації покриття, телекомунікацій та енергоменеджменту. Відповідно для кожної з них є певні показники для оцінки ефективності (табл. 1).

Таблиця 1
Показники для оцінки ефективності підсистем

Планування та оптимізація покриття	Телекомунікацій	Енергоменеджменту
Час розгортання	Зв'язність	Витрата енергії
Відсоток покриття	Пропускна здатність	Час функціонування
Кількість вузлів	Затримка	
Кількість ТА	Обсяг трафіку	
	Навантаження	

Перша підсистема забезпечує покриття певної площі, об'єкта, населеного пункту тощо для обміну/збору інформації такої як стан предмету моніторингу або передача інформації до нього. Друга підсистема має забезпечити обмін даних з вузлами і ТА, включно до базової станції (або супутника) з необхідною якістю. Перед цим процесом мають бути виконане розгортання мережі з формуванням кластерів та точок обміну інформації ТА, маршруту польоту. Третя підсистема відповідає за розподіл енерговитрат між мережевими елементами (кожен з яких має своє джерело живлення). Головна її ціль збільшення тривалості роботи мережі та її елементів за умови мінімальної необхідної якості покриття, обміну/збору даних.

Для раціонального порівняння ефективності представленої телекомунікаційної системи була запропонована методика, що складається з чотирьох етапів.

На першому необхідно задати параметри НПМ:

1. Характеристики МЕ: потужність трансмітерів P_t , робоча частота f_p , смуга пропускання Δf , тип антен, коефіцієнти їх підсилення G_t виходячи

із точності вимірювань, якості передачі мультимедійних даних, часу обміну/збору, повноти отриманої інформації тощо).

2. Характеристики мережі: площа покриття, кількість МЕ ($N_{\text{вуз}}$, $N_{\text{ТА}}$), їх координати, топологія (кількість кластерів та вузлів у них, ліній зв'язку, алгоритм вибору головного вузла кластеру (ГВК) тощо), протокол доступу, вид обслуговування (з гарантією чи без), час роботи.

3. Характеристики методу обміну/збору інформації, а саме: їх тип (послідовно з кожного вузла, з ГВК); МЕ, що виконує організацію кластеру та керування мережею (ЦКМ або ТА або ГВК); алгоритми побудови маршруту польоту (загальний або локальний) та кластерів виходячи із цільової функції (мінімізація кількості ТА, максимізація часу роботи мережі та інші).

На другому етапі потрібно обрати показники оцінки ефективності (із таблиці 1).

На третьому етапі відбувається побудова математичних моделей НПМ (однорівнева з сенсорами всеспрямованої дії та дворівнева з сенсорами спрямованої дії) та проведення експерименту (імітаційного моделювання).

На четвертому етапі отримуємо результати та залежності показників ефективності від різних умов функціонування мережі. Виходячи з вищезазначеного, на останньому етапі необхідно виконати порівняння та зробити висновки.

Для порівняння було побудовано дві математичні моделі: однорівнева з сенсорами всеспрямованої дії (рис. 1) та дворівнева з сенсорами спрямованої дії (рис. 2). Вузли сенсорної мережі розташовуються на нульовому рівні на висоті до 1.5 м, а висота псевдосупутника з яким зв'язуються

БПЛА становить 20 км. В однорівневій моделі висота БПЛА становить до 1км. А в дворівневій моделі: висота БПЛА першого рівня 1,5–2 км, другого – 5–15 км. Усі мережеві елементи розташовані випадковим чином на площі 50 км^2 . Кількість вузлів нульового рівня $N_{\text{вуз}}$ становить 600. БПЛА в однорівневій моделі $N_{\text{ТА}} = 400$, в дворівневій – $N_{\text{ТА}} = 360$ (60 з яких розташовуються на другому рівні). Дальність зв'язку визначалася згідно методики [3] з технологією доступу IEEE 802.11ax. Максимальний радіус обльоту БПЛА першого рівня 4000 м, другого – 8000 м. Потужність передавача вузла 20 dBm, БПЛА першого рівня 25 dBm, другого – 30 dBm, робоча частота 2447 МГц, смуга пропускання 20 МГц. Коефіцієнт підсилення антен вузлів в однорівневій моделі 5 dBi, а в дворівневій – 17 dBi. Розмір пакета передачі даних – 1024 біт.

Головними вузлами кластеру виступають БПЛА першого рівня, які встановлюють зв'язок з доступними у радіусі дії вузлами нульового рівня. У однорівневій моделі БПЛА першого рівня також встановлюють зв'язок з найближчими БПЛА для підтримки зв'язності, а в дворівневій моделі – БПЛА другого рівня (вони являють собою ГВК для БПЛА першого рівня).

Ефективність вдосконаленої моделі оцінювалася за наступними параметрами: довжина маршруту, кількість мережевих елементів, середня пропускна здатність та затримка від вузла нульового рівня до псевдосупутника. Для розрахунку цих показників будемо користуватися методикою запропонованою у розділі 3 та специфікаціями стандарту IEEE 802.11ax у програмному комплексі MATLAB. Кількість проведених вимірювань 10000.

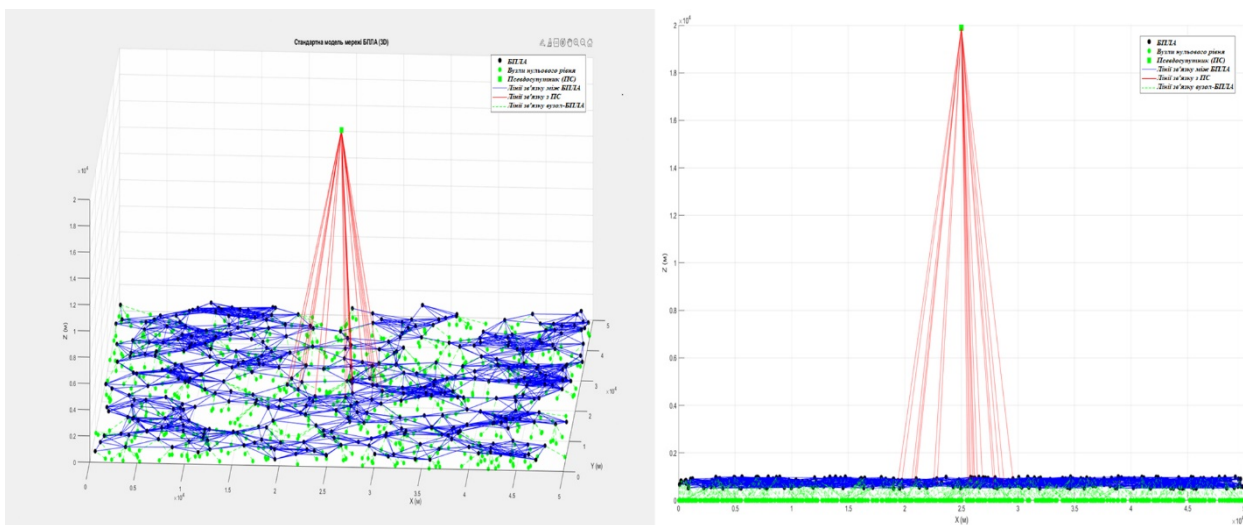


Рис. 1. Однорівнева модель НПМ з вузлами всеспрямованої дії

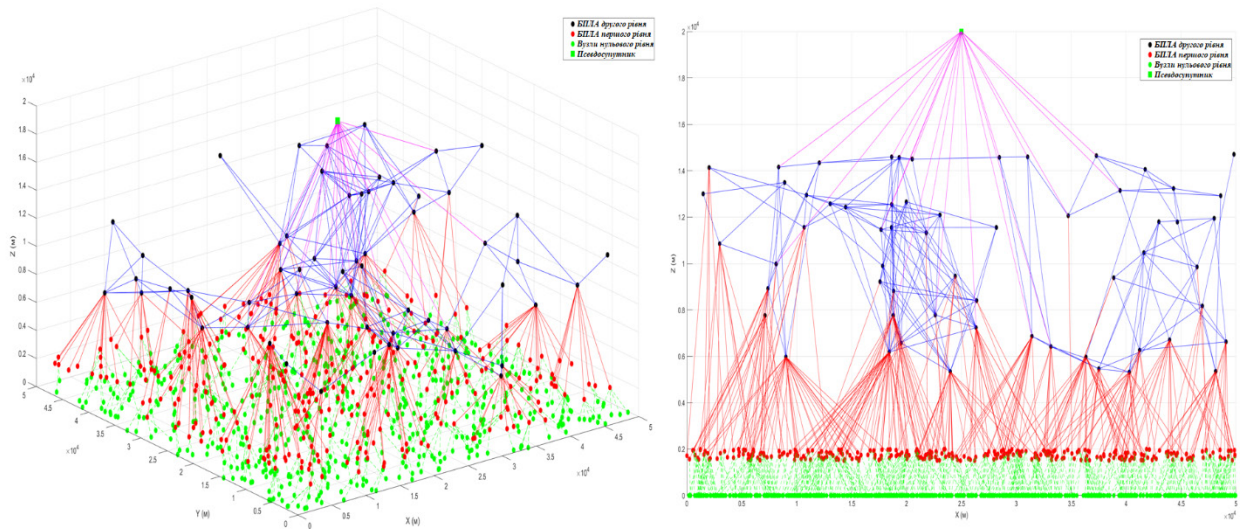


Рис. 2. Дворівнева модель НІМ з вузлами спрямованої дії



Рис. 3. Вимірювання середньої, максимальної та мінімальної довжин маршруту

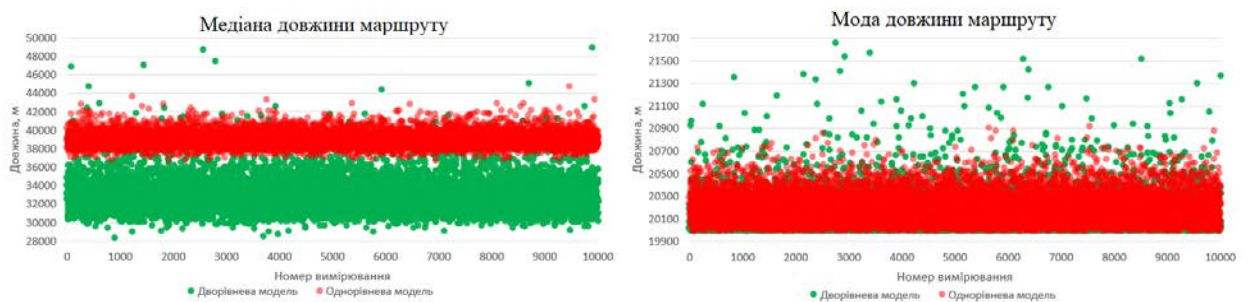


Рис. 4. Вимірювання медіани та моди довжини маршруту

На рисунках 3 та 4 відображено результати імітаційного моделювання для довжини маршруту: середні, максимальні, мінімальні значення, а також їх мода та медіана. Дивлячись на отримані результати можна зробити висновок, що відстань маршруту у вдосконаленій (дворівневій) моделі менша на 1,5–15,2% (за показниками моди, медіани, середнього).

На рисунку 5 відображено результати імітаційного моделювання для кількості мережевих елементів на маршруті від вузла нульового рівня до псевдосупутника включно: середні, максимальні, значення, а також їх мода та медіана. Мінімальні значення для однорівневої моделі – 2, для дворівневої – 3. Дивлячись на отримані результати можна зробити висновок, що кількість МЕ у вдосконаленій (дворівневій) моделі менша на 20–43% за зазначеними вище показниками.

Також були отримані результати середніх значень пропускних здатностей та затримок (рис. 6) від вузлів до псевдосупутника. Отримана пере-

вага у дворівневій моделі становить 41 та 29 відсотків відповідно. Далі слід звернути увагу на залежності середньої пропускної здатності, середніх затримок та кількості МЕ від відстаней (рис. 7 та рис. 8). Із залежності представлені на рисунку 7 можна зробити висновок, що пропускна здатність зменшується зі збільшенням відстані, що збігається із розрахунками у програмному комплексі Atoll [3]. А залежності на рисунку 8 демонструють збільшення затримки та кількості МЕ зі збільшенням відстані відповідно. Узагальнені результати імітаційного моделювання для обох моделей та їх порівняння наведені у таблиці 2.

Висновки. У статті запропоновано методику у якій описується підхід до оцінки ефективності МСМ та раціонального порівняння запропонованої моделі із існуючою. Він складається з чотирьох етапів, а саме: задання вхідних параметрів мережевих елементів та мережі в цілому, обрання доступних показників ефективності, побудова математичних моделей на основі вказаної інфор-

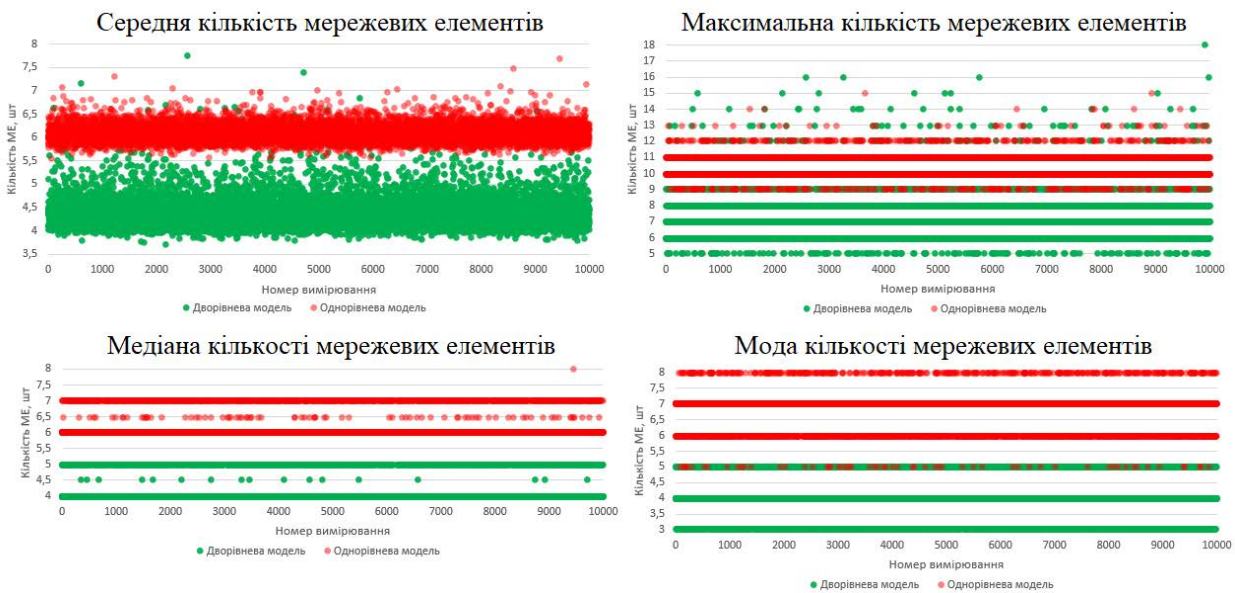


Рис. 5. Вимірювання середньої, максимальної кількості мережевих елементів, їх медіани і моди

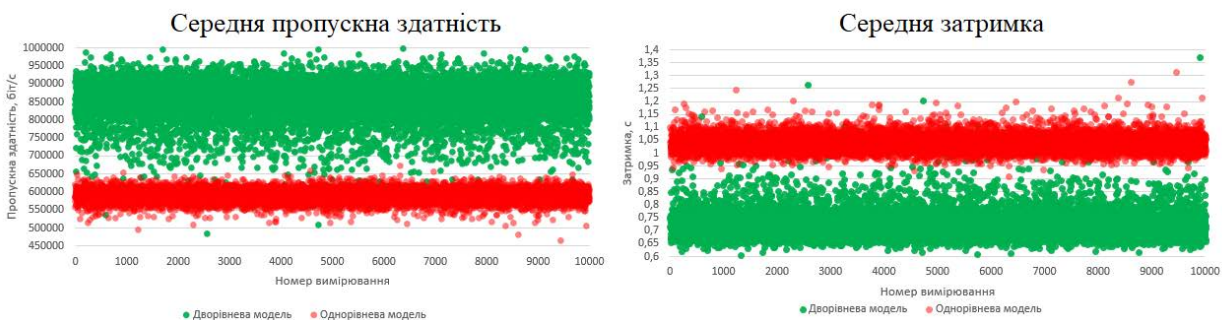


Рис. 6. Вимірювання середньої пропускної здатності та затримок

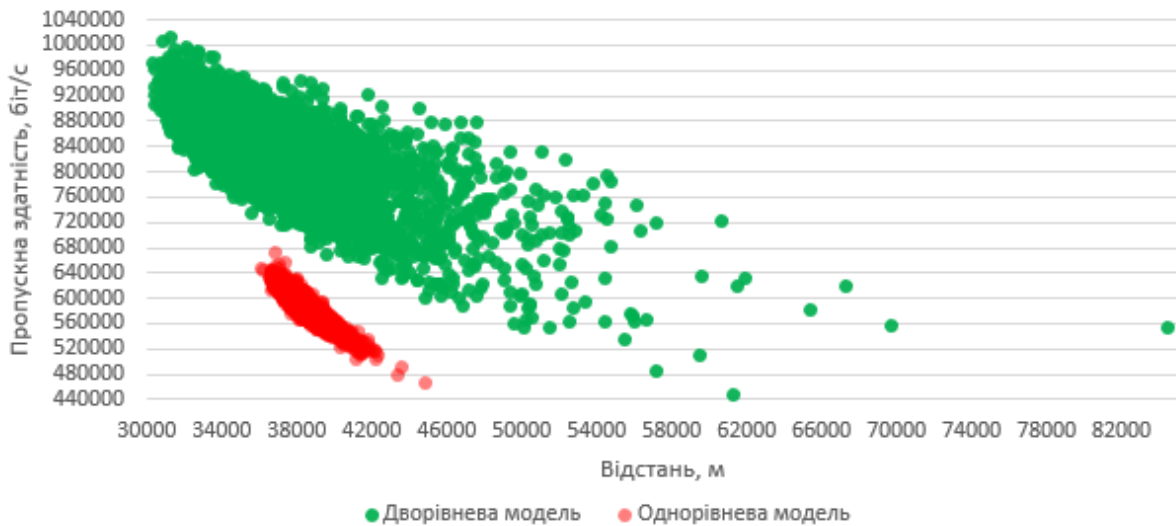


Рис. 7. Залежність середньої пропускної здатності від середньої відстані

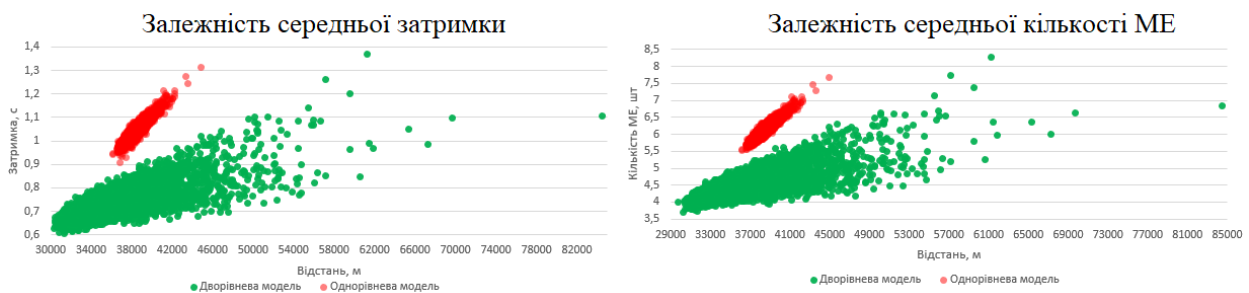


Рис. 8. Залежність середньої затримки та середньої кількості МЕ від середньої відстані

Таблиця 2

Узагальнені результати імітаційного моделювання

Показник	Однорівнева модель	Дворівнева модель	Різниця, %
Середня довжина маршруту, м	37649,13	33673,45	10,55
Максимальна довжина маршруту, м	58340,52	62871,89	-7,77
Мінімальна довжина маршруту, м	20397,6	20075,12	1,58
Медіана довжини маршруту, м	38413,1	32561,065	15,23
Мода довжини маршруту, м	20397,6	20075,12	1,58
Середня кількість МЕ, шт.	6,04	4,351	28,04
Максимальна кількість МЕ, шт.	10	8	20
Мінімальна кількість МЕ, шт.	2	3	-50
Медіана кількості МЕ, шт.	6	4	33,33
Мода кількості МЕ, шт.	7	4	42,86
Пропускна здатність, біт/с	602846,77	852071,01	-41,34
Загальна затримка, с	1,02	0,72	29,25

мації та отримання результатів з підготовкою необхідних залежностей.

Було визначено перелік показників для оцінки ефективності в кожній із підсистем керування мережею (планування та оптимізації покриття, телекомунікацій, енергоменеджменту).

Представлено дві математичні моделі: МСМ все-спрямованої дії із використанням одного рівня ТА і МСМ спрямованої дії із використанням ТА дво-

рівневого розташування. Отримані результати імітаційного моделювання запропонованої та існуючої моделі на основі яких були побудовані візуальні представлення і порівняння у вигляді сімейства графіків та загальної таблиці. А також представлено залежності середніх значень затримок, пропускної здатності та кількості МЕ від середньої довжини маршруту.

Отримані результати показують, що відстань маршруту у вдосконаленій (дворівневій) моделі

менша на 1,5–15,2% (за показниками моди, медіани, середнього) та на 7,8% більша за максимальним показником. Кількість МЕ у вдосконаленій моделі менша на 20 – 43% за розглянутими показниками (крім показника мінімальної кількості де він становить 3), а перевага у середній пропускній здатності та затримці становить 41 та 29 відсотків відповідно.

Загалом бачимо збільшення пропускної здатності у представленій моделі за середнім показником, зменшення необхідної кількості мережевих елементів (ТА) і довжини маршруту від вузла до псевдосупутника. Проте мінімальна необхідна

кількість ТА (включно із псевдосупутником) в запропонованій моделі на одну одиницю більше (що є її необхідною умовою функціонування), а також у невеликій кількості вимірювань середня довжина маршруту у запропонованій моделі більша ніж в існуючій, що зумовлено розташуванням мережевих елементів (ТА і сенсорів) на значній відстані один від одного. Наукова новизна полягає у перевірці ефективності вперше запропонованого вдосконаленого методу підтримки зв'язності мобільної сенсорної мережі, який можливо використовувати у подальших наукових та виробничих цілях.

Список літератури:

1. V. Romaniuk, O. Lysenko, V. Novikov, and I. Sushyn, Development of methods of positioning, localization and data collection from nodes of a free mobile sensor network using intelligent adaptive telecommunication AEROPLATFORMS, Information and Telecommunication Sciences, 2021 no. 2, pp. 40–49.

2. Sushyn, I., Lysenko, O., Romaniuk, V., Yavisiya, V., Kyselov, V., Novikov, V. UAV Connectivity Maintenance in Wireless Sensor Networks. In: Luntovskyy, A., Klymash, M., Melnyk, I., Beshley, M., Schill, A. (eds) Digital Ecosystems: Interconnecting Advanced Networks with AI Applications. TCSET 2024. Lecture Notes in Electrical Engineering, vol 1198, 2024, pp 843–857.

3. Сушин І.О., Лисенко О.І. «Універсальна методика передачі даних із застосуванням сенсорів спрямованої дії», Вчені записки Таврійського Національного Університету імені В.І. Вернадського, Серія: Технічні науки, том 35 (74) № 2, с. 6–14, 2024.

4. Сушин І.О., Лисенко О.І., Авдеєнко Г.Л., «Застосування сенсорів спрямованої дії в мобільних безпроводових сенсорних мережах», Вісімнадцята міжнародна науково-технічна конференція «ПЕРСПЕКТИВИ ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙ», с. 199-202, 15–19 квітня 2024р.

5. Сушин І.О., Буткевич Г.Ю., «Методика оцінки зв'язності вузлів бездротової сенсорної мережі при умові використання багаторівневої мережі телекомунікаційних аероплатформ», Вчені записки Таврійського Національного Університету імені В.І. Вернадського, Серія: Технічні науки, том 34 (73) № 6, с. 39–46, 2023.

6. Сушин І.О., Лисенко О.І., «Програма оцінки зв'язності вузлів безпроводових епізодичних мереж при умові застосування бпла», Сімнадцята міжнародна науково-технічна конференція «ПЕРСПЕКТИВИ ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙ», с. 36-41, 18–21 квітня 2023р.

7. Валуцький С.В. Вдосконалений метод підвищення пропускної здатності епізодичних радіомереж з управлінням положенням телекомунікаційних аероплатформ. Науковий вісник Академії муніципального управління. Збірник наукових праць. Серія «Техніка». 2014. Вип. 7. С. 25–34.

8. Шабельник Т., Кривенко С, Конєва О. Система автоматичного пілотування безпілотних летальних апаратів в умовах відсутності радіозв'язку. Кібербезпека: освіта, наука, техніка київського університету імені Бориса Грінченка. №1 (9), 2020.

9. Гримуд А.Г., Романюк В.А., Модель пошуку траєкторії польоту телекомунікаційною аероплатформою для збору даних з вузлів кластеризованої бездротової сенсорної мережі військового призначення, Збірник наукових праць Центру воєнно-стратегічних досліджень No 1(74), 2022 Національного університету оборони України імені Івана Черняховського.

10. Романюк В.А., Лисенко О.І., Романюк А.В., Новіков В.І., Гуйда О.Г., Метод збору інформації з вузлів безпроводової сенсорної мережі з використанням інтелектуальних адаптивних літаючих інформаційно-телекомунікаційних роботів, Вчені записки Таврійського Національного Університету імені В.І. Вернадського, Серія: Технічні науки, том 32 (71) ч.2 №2, 2021р, с. 25–35.

Sushyn I.O., Lysenko O.I. EVALUATION OF METHOD EFFECTIVENESS FOR MAINTAINING CONNECTIVITY IN A MOBILE NETWORK WITH DIRECTED ACTION SENSORS USING TELECOMMUNICATION AERIAL PLATFORMS AT DIFFERENT LOCATION LEVELS

It has been studied that mobile sensor networks are a significant part of wireless sensor networks in general. There are processes of their constant improvement with advancements such as directed action sensors and the implementation of multi-layers telecommunication aerial platforms, etc. Using effective methods to enhance

network performance is crucial, creating a scientific challenge to develop a methodology for evaluating the effectiveness of procedures for maintaining connectivity in mobile networks with directed action sensors using telecommunication aerial platforms at different location levels.

The article considers the list of possible parameters which will be selected for comparison, and forms the necessary input data for simulation modelling. Also presented the structure of mobile sensor networks utilizing telecommunication aerial platforms (UAVs), based on which mathematical models are built. Specifically, a mobile network with omni-directed action sensors using one level of UAVs and a mobile network with directed action sensors using two levels of UAVs. The lower level consists of UAVs with lower power (generally helicopter-type), while the upper level includes UAVs with higher power (generally airplane-type). In both cases, information is transmitted to a pseudo-satellite connected to traditional communication networks.

The average route length, delay, number of UAVs from the node to the pseudo-satellite, their median, mode, along with average throughput were calculated using Matlab software environment. The throughput against distance trend aligns with previous calculations performed in the Atoll software. These results confirm the actuality of mobile networks with directed action sensors using multi-layer telecommunication aerial platforms for scientific and industrial purposes.

Key words: *MSN, telecommunication aerial platform, directed action sensors, omni-directed action sensors, UAVs.*

УДК 621.372

DOI <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2024.5.1/13>**Шевцов К.О.**Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»**Живков О.П.**Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

ПРЯМОКУТНІ МІКРОСТРІЧКОВІ РЕЗОНАТОРИ ЯК ЕЛЕМЕНТ РЕКТЕН ТА ЇХ МЕТАМАТЕРІАЛЬНІ ВЛАСТИВОСТІ

У статті розкрито сутність ректен, або антенних систем з випрямленням, як високоефективних пристроїв для збору радіочастотної енергії (RF) та її перетворення на постійний струм. Визначено, що ці пристрої відіграють важливу роль у розвитку технологій бездротового живлення, особливо в умовах, де доступ до традиційних джерел енергії є обмеженим або уривчастим та з'ясовано, що ректени базуються на мікросмушкових антенах, які приймають електромагнітні хвилі на заданих частотах, а також на фільтрах, що забезпечують точне виділення необхідних сигналів.

У статті визначено, що одним з ключових компонентів ректен є мікросмушкові резонатори, які дозволяють ефективно працювати на потрібних частотах, мінімізуючи втрати та завади та продемонстровано Резонанс Фано, який виникає у таких резонаторах і забезпечує високу ефективність перетворення енергії завдяки своїм унікальним властивостям, що дозволяють зменшувати завади і підвищувати селективність сигналів.

Оскільки дослідження ректен є перспективним напрямом у сфері енергозбереження та бездротових технологій, у статті розкрито, як ці пристрої дозволяють збирати енергію з навколишнього середовища, наприклад, із мобільних мереж або сигналів Wi-Fi та продемонстровано їх застосування в таких галузях, як інтернет речей (IoT), сенсорні мережі та дистанційне живлення пристроїв. Особливу увагу приділено здатності ректен працювати в умовах низької інтенсивності сигналів, що робить їх незамінними у ситуаціях, де використання інших джерел живлення є неможливим.

У статті розкрито сучасні підходи до проектування ректен на основі мікросмушкових резонаторів, а також вплив резонансу Фано на характеристики фільтрів у таких пристроях. Зокрема, досліджується вплив геометрії резонаторів на роботу фільтрів та способи їх оптимізації для максимального збору енергії в конкретних умовах.

Ключові слова: ректена, антена, фільтр, мікросмушкові резонатори, резонанс Фано, збирання енергії.

Постановка проблеми. Сучасні системи бездротової передачі енергії та комунікаційні технології потребують високоефективних та надійних фільтрів, здатних селективно обробляти сигнали різних частот, а також забезпечувати ефективне збирання енергії. Мікросмушкові прямокутні резонатори мають значний потенціал для вирішення цих завдань, проте їхні резонансні властивості, зокрема феномен резонансу Фано, ще недостатньо вивчені у контексті практичного використання для підвищення ефективності фільтрації та збору енергії в ректенах і метаматеріалах. Проблема полягає у необхідності глибшого аналізу цих структур для розробки більш ефективних рішень у сфері бездротової передачі енергії та сенсорних систем.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. У статті [5] описано конструкцію та властивості

спрямованих фільтрів на основі кругових резонаторів і діелектричних резонаторів. Також розглядаються мікросмушкові прямокутні резонатори та їх використання для створення смугово-пропускних фільтрів направленої зони. Ректени на базі подібних пристроїв можуть мати кращу селективність частот за рахунок направленості. У статті [11] представлено розробку, моделювання, виготовлення та вимірювання компактної схеми збору енергії. Для цієї схеми збору енергії використовується квадратурний гібридний дільник через його високу ізоляцію та відсутність втрат. Він ефективно подає сигнал на мостовий випрямляч, поєднуючи сигнали, отримані від двох антен. Компонент мостового випрямляча забезпечує повнохвильове випрямлення сигналу від двожилого змінного струму. Згідно з тео-

ретичними та практичними результатами, схема збору енергії може працювати для застосувань у сенсорних мережах бездротових локальних мереж, що робить його актуальним для використання, у ролі формувача кругової поляризації в мікрохвильових антенах і ректенах, що дозволяє ректені ефективно працювати незалежно від орієнтації передавальної антени чи джерела сигналу. Це важливо для мобільних або непередбачувано рухомих об'єктів, де неможливо постійно підтримувати фіксовану орієнтацію антени.

Постановка завдання. Метою статті є огляд структури ректен та дослідження та аналіз використання мікросмужкових прямокутних резонаторів як їх складової.

Виклад основного матеріалу. Ректени (rectenna – rectifying antenna) – це пристрої, що поєднують антену і випрямляч для перетворення радіочастотної енергії на постійний струм. В умовах частих відключень електроенергії в Україні ректени можуть бути застосовані для збору енергії з радіочастотних джерел, що дозволяє використовувати їх як додаткове або резервне джерело живлення для невеликих електронних пристроїв таких як датчики, трекери або радіомітки. Вони можуть бути розташовані поблизу джерел радіохвиль, наприклад, Wi-Fi або мобільних вишок.

У густонаселених районах з високою концентрацією радіосигналів (Wi-Fi, мобільні мережі, телевізійні станції) ректени можуть ефективно збирати енергію для живлення невеликих пристроїв, таких як датчики або системи безпеки. Хоча ректени поки що не здатні замінити основні джерела живлення через відносно низьку ефективність, вони можуть стати корисним додатковим компонентом для підтримання роботи малопотужних систем під час енергетичних криз.

Історія створення ректен охоплює кілька десятиліть, починаючи з фундаментальних досліджень електромагнітних хвиль і завершуючи сучасними інноваціями в галузі бездротової передачі енергії. Ректени є важливою частиною цієї еволюції, оскільки вони лежать в основі технологій, що можуть змінити майбутнє енергетики, зокрема в умовах переходу до бездротових систем.

Ранні дослідження та теоретичні основи

Історія ректен бере свій початок з робіт великих науковців, таких як Джеймс Клерк Максвелл, Генріх Герц і Нікола Тесла. Основи використання електромагнітних хвиль для передачі енергії були закладені ще в кінці XIX століття, коли Максвелл у 1865 році створив теорію електромагнітного поля [1]. Це відкриття стало основою для розу-

міння, як енергія може передаватися у вигляді хвиль через простір.

У 1888 році Генріх Герц експериментально підтвердив існування електромагнітних хвиль, що дозволило почати вивчення можливостей їх використання для передачі енергії на відстань [2]. Одним із перших, хто зацікавився цією темою, був Нікола Тесла. На рубежі XIX і XX століть він експериментував з бездротовою передачею електроенергії через свої знамениті «катушки Тесли», створюючи прототипи технологій, що використовують електромагнітні хвилі.

На той час ці експерименти не отримали широкого практичного застосування через низьку ефективність і відсутність технологій для збору енергії з радіохвиль. Проте саме ці ранні дослідження заклали теоретичні основи для створення ректен.

Поява концепції ректени

Ректени як технологія почали розвиватися у середині XX століття, коли з'явилися напівпровідникові діоди, здатні працювати на високих частотах. Одним із перших практичних застосувань ректен стало дослідження в області бездротової передачі енергії для супутників та космічних систем.

У 1960-х роках американський інженер Вільям Браун, працюючи в компанії Raytheon, вперше запропонував ідею використання мікрохвиль для бездротової передачі енергії на великі відстані. Його дослідження зосереджувались на передачі енергії через мікрохвилі до літальних апаратів і супутників [3]. У 1964 році Браун створив першу діючу ректену, яка використовувала антену для збору мікрохвильової енергії та випрямляч для її перетворення на постійний струм. Перший публічний демонстраційний проєкт Брауна показав, що можна передати енергію для живлення маленького безпілотного вертольота на відстані кількох метрів. Цей експеримент продемонстрував життєздатність ректен як технології для бездротової передачі енергії.

Розвиток у космічних технологіях

Протягом 1970-х і 1980-х років ректени почали активно розглядатися в космічних програмах. Ідея полягала в тому, щоб використовувати мікрохвильову передачу енергії для живлення супутників, що знаходяться на орбіті, або для передачі енергії з космічних сонячних станцій на Землю.

NASA та інші космічні агенції розпочали експерименти з концепцією «солярної енергії з космосу», де сонячні панелі на орбіті збирали б енергію і передавали її на Землю за допомогою мікрохвиль [4]. Ректени на Землі збирали б цю енергію і перетворювали її на електрику. Хоча ці

проекти не досягли широкого практичного впровадження, вони значно просунули розробку ректен та бездротових систем енергопередачі.

Використання ректен у сучасних технологіях

У 1990-х і 2000-х роках розробка ректен продовжувала розвиватися, але основна увага приділялася не космічним проектам, а земним застосуванням. Технології бездротової передачі енергії стали важливою темою для мобільних пристроїв, електронних датчиків і систем збору енергії з навколишнього середовища.

З розвитком Інтернету речей (IoT) ректени знайшли своє застосування в системах збирання енергії для живлення малопотужних датчиків і пристроїв. Сучасні ректени можуть збирати енергію з радіохвиль від мобільних мереж, Wi-Fi або телевізійних передавачів, що робить їх перспективними для бездротових мереж живлення. Одним з цікавих прикладів є проекти з бездротової зарядки мобільних пристроїв. Наприклад, компанії розробляють системи, що дозволяють заряджати телефони чи інші гаджети за допомогою ректен, використовуючи радіохвилі, що вже присутні в повсякденному середовищі.

Майбутнє ректен і бездротової передачі енергії

На сьогодні ректени продовжують бути важливою частиною досліджень у галузі енергетики. Вчені працюють над підвищенням ефективності ректен і розширенням спектру їх застосування. Мета полягає в тому, щоб створити системи, які зможуть збирати енергію з радіочастотних сигналів з високою ефективністю і на великих відстанях.

Однією з перспективних галузей є розвиток бездротових електростанцій, які можуть передавати енергію на далекі відстані без потреби в кабелях. Це може бути корисно не лише для зарядки мобільних пристроїв, але і для постачання енергії до віддалених районів або космічних апаратів. Крім того, ректени можуть відігравати важливу роль у розширенні відновлюваної енергетики. Наприклад, проекти з використання ректен для передачі енергії від сонячних батарей, розташованих на великих відстанях, є важливими кроками на шляху до сталого майбутнього.

Структура Ректени

Ректена складається з кількох основних компонентів, які дозволяють їй перетворювати радіочастотну (RF) енергію на електричну.

Антенa (та схема узгодження). Основний елемент, який приймає радіочастотні сигнали. Антенa може бути різних типів залежно від частоти, на якій працює ректена. Зазвичай використовуються дипольні антени або мікросмужкові

антени, які можуть захоплювати радіохвилі від різних джерел, таких як мобільні мережі, Wi-Fi чи телевізійні передавачі.

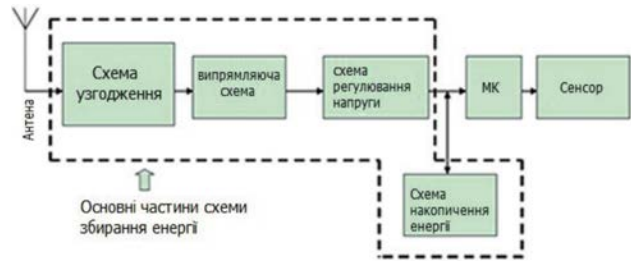


Рис. 1. Структура ректени з корисним навантаженням у вигляді мікроконтролера та сенсора

Випрямляюча схема (діод). Основний компонент, що перетворює змінний струм, отриманий від антени, на постійний струм. Найчастіше використовуються височастотні діоди (шотткі-діоди), які мають низьке пряме падіння напруги і можуть працювати на високих частотах, характерних для радіочастотних сигналів.

Схема регулювання напруги. Цей компонент відсікає височастотні складові сигналу після випрямлення і згладжує вихідний сигнал, забезпечуючи стабільний постійний струм.

Навантаження (акумулятор або інший пристрій). Енергія, перетворена з радіочастотного сигналу, подається на навантаження – це може бути або резистор для тестування, або реальний пристрій, який використовує отриману електричну енергію, наприклад, датчик, мікроконтролер або акумулятор для заряджання.

Для того щоб ректена могла ефективно приймати та збирати енергію в більш широкому частотному діапазоні, необхідно розширити її смугу пропускання. Це можливо досягти за рахунок використання ортогональних типів коливань, які дозволяють пристрою функціонувати на різних частотах одночасно, що значно підвищує її ефективність. Ортогональні типи коливань забезпечують більшу гнучкість і адаптивність системи до різних умов прийому сигналу. Такі коливання досліджувалися нами раніше під час вивчення властивостей прямокутних мікросмужкових резонаторів. Виявилось, що ці резонатори здатні демонструвати резонанс Фано, що також сприяє розширенню смуги пропускання та покращенню характеристик пристрою. Завдяки цим властивостям прямокутні мікросмужкові резонатори стають перспективним компонентом для використання в ректенах, що збирають енергію з радіочастотних випромінювань у широкому спектрі частот.

Мікросмушкові резонатори стали важливим елементом у розвитку ректен та інших бездротових технологій, оскільки вони дозволяють більш ефективно збирати радіочастотну енергію з різних джерел. Це робить їх перспективними для широкого спектра застосувань, від живлення малопотужних пристроїв до сенсорних систем і космічних програм. Однак останні дослідження мікросмушкових структур показують, що ці технології можуть мати ще більш значні перспективи. Зокрема, це стосується використання резонансних властивостей мікросмушкових резонаторів у різних галузях електроніки, включаючи комунікаційні системи, антенні технології та сенсори. Резонанс Фано, який відіграє ключову роль у сучасних розробках, дозволяє створювати структури з високими показниками ефективності та чутливості.

У [5, с. 281–283] розглядаються мікросмушкові прямокутні резонатори та їх використання для створення смугово-пропускних фільтрів направленої зони. Ректени на базі подібних пристроїв можуть мати кращу селективність частот за рахунок направленості. Раніше такі резонатори широко використовувалися у вигляді хвилеводних структур [6, 7]. При заміні хвилеводних резонаторних структур на мікросмушкові, слід враховувати той факт, що в області мікросмушкових ліній існують парні та непарні моди з різними хвильовими параметрами [8, с. 55–57].

Розглянемо використання прямокутного мікросмушкового резонатора у вигляді фільтра

з прорізами (рис. 1 а, б)). Залежно від співвідношення сторін резонатора (довжина і ширина) при однаковому периметрі коефіцієнт передачі фільтра може приймати форму аномально крутої резонансної характеристики типу резонансу Фано (помаранчева крива на нижньому графіку Рис. 1 в) [9, с. 703–771], або у вигляді кривої з двома горбами (синя крива на нижньому графіку Рис. 1 г). На верхньому графіку рис. 1 а) показано фазові (штрихові криві) та часові (GD – суцільні криві) криві коефіцієнтів передачі S21 (помаранчева та сині криві) при дуже незначній зміні (0,01 мм) зазору між резонатором та лінією під час «перескакування» через резонанс Фано – перехід від області аномальних до області нормальних фазових характеристик [10, с. 278–298]. Видно, що фазова характеристика S21 поблизу резонансу Фано може мати як нормальний, так і аномальний характер, тому її частотна похідна, GD, може мати як додатні, так і від’ємні значення в області резонансу.

На рис. 2 г) показані амплітудні (нижній графік) та частотні характеристики (верхній графік) коефіцієнтів передачі фільтра з прорізами для різних співвідношень довжин сторін резонаторів (при однаковому периметрі). Характеристики, представлені помаранчевою кривою, відповідають виродженим коливанням (резонанс Фано, структура на рис. 2 а), а сині криві демонструють режим «усунення виродження» (структура на рис. 2 б)). Як видно, фільтр із прорізами на основі мікросмушкового прямокутного резонатора може

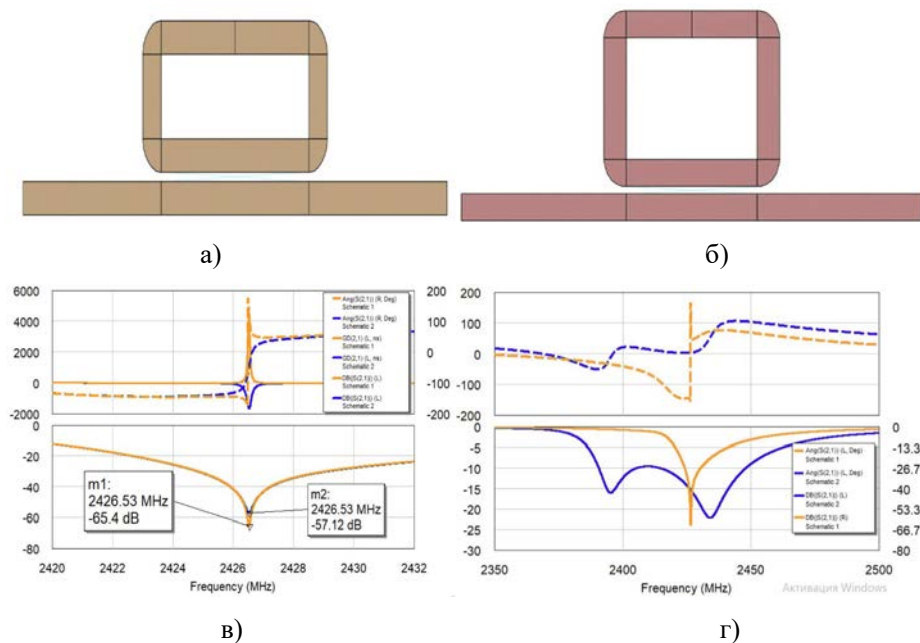


Рис. 2. а) та б) – прямокутні резонатори з однаковим периметром і різними співвідношеннями довжини та ширини; в) – г) – амплітудні (нижні графіки), частотні та часові (верхні графіки) характеристики резонаторів із різними співвідношеннями довжини та ширини

забезпечувати як дуже високе затухання у вузькому діапазоні частот, так і дещо менше затухання в порівняно широкому діапазоні частот, оскільки його характеристика фактично відповідає характеристиці двохрезонаторного фільтра (кожен тип коливання відповідає одному «резонатору»). Типовим прикладом ректени є ректена з використанням двох патч антен та квадратурного гібридного спрямовувача [11] що теж має метаматеріальні властивості

Мікросмужкові прямокутні структури також широко використовуються у вигляді квадратурного гібридного спрямовувача, наприклад, для формування кругової поляризації в мікрохвильових антенах і ректенах [12]. У цьому варіанті, коли мікросмужкова структура безпосередньо під'єднана до лінії передачі, її можна вважати «щільно зв'язаним» резонатором.

Для забезпечення фазового зсуву на 90° між другим і третім виходами (умова для формування кругової поляризації) і поділу вхідної потужності навпіл, прямокутник має бути у формі квадрата (рис. 3 а). На рис. 3 б) представлені амплітудні (нижній графік), фазові (штрихові криві) і часові (суцільні криві) характеристики (верхній графік) квадратурного гібридного спрямовувача, які демонструють його «метаматеріальні» властивості.

Коефіцієнти передачі S41 (помаранчева крива) та коефіцієнти відбиття S11 (синя крива) мають резонансний характер (тип інтерференції резонансу Фано). Це підтверджується їхніми фазовими та часовими характеристиками, причому S41 характеризується аномальною фазовою характеристикою і, як наслідок, позитивним значенням GD.

Ми активно працюємо над модернізацією ректен, здійснюючи перехід від патч-антен до більш

ефективних тривимірних антен, побудованих на основі діелектричних резонаторів. Ця нова архітектура дозволяє значно підвищити ефективність збору енергії завдяки покращеній продуктивності антенних систем у різних частотних діапазонах. Дослідження спрямовані на оптимізацію параметрів діелектричних резонаторів для досягнення максимальних показників ефективності та надійності роботи ректен в умовах складних електромагнітних середовищ. Ці роботи проводяться в рамках проекту НАТО, метою якого є розвиток передових технологій для збору енергії та підвищення ефективності бездротових систем живлення. [13, с. 75–77]

Висновки. Ректени є важливою складовою сучасних технологій бездротової передачі енергії, що пройшли значний еволюційний шлях від теоретичних досліджень Максвелла та Тесли до практичних застосувань у мікрохвильовій передачі енергії та сучасних телекомунікаційних системах. Спочатку засновані на хвилеводних структурах, ректени згодом перейшли на мікросмужкові технології, що дозволило суттєво розширити їхнє застосування завдяки компактності та ефективності. Унікальні резонансні характеристики прямокутних мікросмужкових резонаторів, подібні до резонансу Фано в метаматеріальних комірках, спричинені інтерференційними явищами в цих структурах і тому, за певних параметрів, можуть демонструвати характеристики, притаманні метаматеріальним коміркам – аномальну дисперсію та великі позитивні значення GD.

Подяка. Робота проведена при підтримці SSF Project 2022-03-18 UKR22-0018 “THz-metamaterial for communication and sensing” та NATO project SPS G6002 – “3D Metamaterials for Energy Harvesting and Electromagnetic Sensing”.

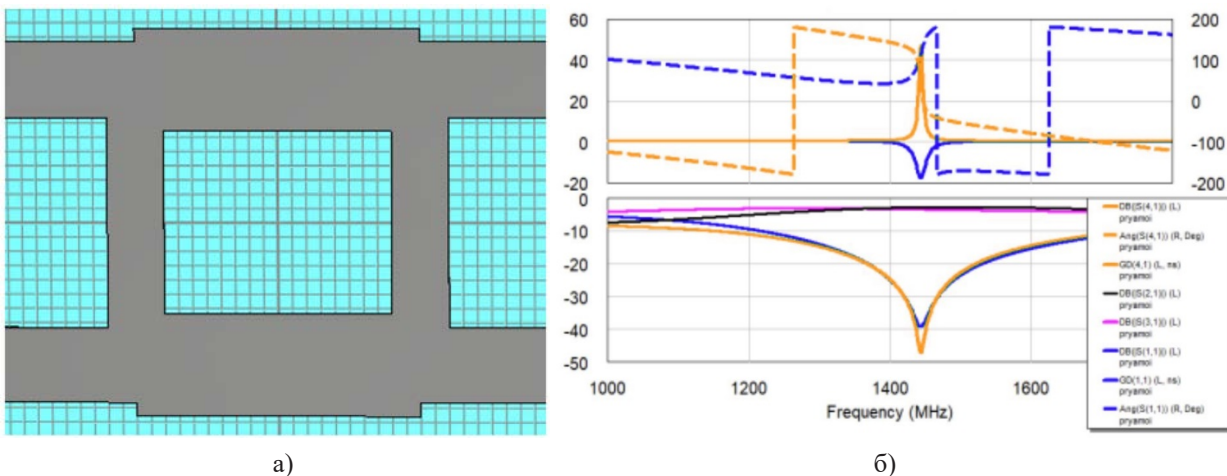


Рис. 3. а) мікросмужковий квадратурний гібридний спрямовувач; б) амплітудні (нижній графік), часові (суцільні криві) і частотні (штрихові криві) характеристики на верхньому графіку, помаранчеві криві – характеристики S41, сині криві – характеристики S11

Список літератури:

1. Максвелл Дж. К. Теорія електромагнітного поля. Кембридж, 1865.
2. Герц Г. Електромагнітні хвилі: Експериментальні дослідження. Лейпциг, 1888.
3. Brown W.C. The History of Power Transmission by Radio Waves. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques. 1984.
4. Brown W.C. Microwave Transmission of Power for Space Solar Power Satellites. Journal of Microwave Power. 1973.
5. Kamarali R. V., Zhivkov O. P., Shevtsov K. O., Krylach O. F., Stepanenko V. M. Microwave Directional Filters Proceedings of the International Scientific Conference "MODERN CHALLENGES IN TELECOMMUNICATIONS". 2023. P. 281–283.
6. Matthaei G. L., Young L., Jones E. M. T. Microwave Filters, Impedance-Matching Networks, and Coupling Structures. New York: McGraw-Hill Book Co. Inc., 1964.
7. Coale F. S. A Traveling-Wave Directional Filter. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques. 1956. T. 4, № 4. P. 256–260. doi:10.1109/tmtt.1956.1125073.
8. Chen W. H. Even and Odd Mode Impedance of Coupled Pairs of Microstrip Lines (Correspondence). IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques. 1970. T. 18, № 1. P. 55–57. doi:10.1109/TMTT.1970.1127138.
9. Limonov M. F. Fano resonance for applications. Adv. Opt. Photon. 2021. T. 13. P. 703–771. <https://doi.org/10.1364/AOP.420731>.
10. Ilchenko M., Zhivkov A. Bridge equivalent circuits for microwave filters and Fano resonance. Proceedings of the UkrMiCo Conference. March 2019. P. 278–298.
11. Agwil R. O., Benchikh S., Djillali H., Tatu S. O. Antenna rectifier using quadrature hybrid coupler for power-harvesting applications. International Journal of RF and Microwave Computer-Aided Engineering. 2020. DOI: 10.1002/mmce.22279
12. Agwil R. O., Benchikh S., Djillali H., Tatu S. O. Antenna rectifier using quadrature hybrid coupler for power-harvesting applications. International Journal of RF and Microwave Computer-Aided Engineering. 2020. e22279. doi:10.1002/mmce.22279.
13. Galitskiy I., Kamarali R., Shevtsov K., Kirilyuk V microstrip 4-resonator filters with attenuation poles. Proceedings of the International Scientific Conference "MODERN CHALLENGES IN TELECOMMUNICATIONS". 2023. P. 75–77.

Shevtsov K.O., Zhivkov O.P. RECTANGULAR MICROSTRIP RESONATORS AS A RECTENNA ELEMENT AND THEIR METAMATERIAL PROPERTIES

The article reveals the essence of rectennas, or rectifying antenna systems, as highly efficient devices for collecting radio frequency (RF) energy and converting it into direct current. It is established that these devices play a significant role in the development of wireless power technologies, especially in environments where access to traditional energy sources is limited or intermittent. Rectennas are based on microstrip antennas that receive electromagnetic waves at specified frequencies, as well as filters that ensure precise extraction of the necessary signals.

The article identifies that one of the key components of rectennas is microstrip resonators, which allow efficient operation at the required frequencies, minimizing losses and interference. The phenomenon of Fano resonance, which occurs in such resonators, is demonstrated to provide high energy conversion efficiency due to its unique properties, enabling reduced interference and enhanced signal selectivity.

Since research on rectennas is a promising area in the field of energy conservation and wireless technologies, the article explores how these devices enable energy harvesting from the surrounding environment, such as from mobile networks or Wi-Fi signals. Their applications are demonstrated in areas such as the Internet of Things (IoT), sensor networks, and remote device powering. Special attention is given to the ability of rectennas to operate in low-signal-intensity conditions, making them indispensable in situations where the use of other power sources is impossible.

The article discusses modern approaches to designing rectennas based on microstrip resonators, as well as the impact of Fano resonance on filter characteristics in such devices. In particular, the influence of resonator geometry on filter performance is studied, along with optimization methods for maximizing energy collection under specific conditions.

Key words: Rectenna, Antenna, Filter, microstrip resonators, Fano resonance, energy harvesting.

ІНФОРМАТИКА, ОБЧИСЛЮВАЛЬНА ТЕХНІКА ТА АВТОМАТИЗАЦІЯ

УДК 004.75

DOI <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2024.5.1/14>**Богдан Г.А.**Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»**Глуценко М.О.**Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

ГАЗОВІ СЕНСОРИ: СУЧАСНИЙ СТАН ТА ПЕРСПЕКТИВИ

Розвиток промисловості суттєво збільшив кількість шкідливих викидів у атмосферу, що суттєво впливає на стан екології, а отже і на здоров'я людей. Це робить актуальним впровадження автоматизованих систем контролю якості повітря на підприємствах енергетичного комплексу, видобувної та переробної промисловості, частка викиду у атмосферу шкідливих речовин яких складає до 90% від загальної кількості викидів в атмосферу. Перелік шкідливих речовин, наявність і концентрація яких підлягає обов'язковому контролю, досить значний і включає в себе: оксиди азоту NO , NO_2 , N_2O ; монооксид вуглецю CO , вуглекислий газ (діоксид вуглецю) CO_2 , оксид сірки SO_2 , вуглеводневі гази (CH_4 , C_2H_6 , C_2H_4 та інші), тверді частки речовин у повітрі.

Відповідно системи моніторингу якості повітря повинні мати розгалужену систему сенсорів, які здатні визначати наявність в повітрі всіх цих речовин. Використання різних, за принципом роботи, типів датчиків дозволяє значно розширити моніторинг даних в рамках різноманітних виробничих задач та процесів. Для масового застосування сучасні датчики повинні бути дешевими, надійними, енергозберігаючими та мати значний термін працездатності.

У цій статті ми розглянули основні типи сенсорів в залежності від фізичного принципу покладеного в основу їх роботи. Визначили, що для адекватної оцінки ефективності методів виявлення газу слід враховувати такі показники, як: чутливість, селективність, час спрацьовування, енергоспоживання, оборотність, собівартість виготовлення. Було визначено, що серед газових датчиків, яким притаманна оборотність, найчастіше в системах моніторингу якості повітря використовують напівпровідникові, електрохімічні та оптичні сенсори.

В статті розглянуто переваги та недоліки кожного з типів сенсорів, області їх застосування, перспективи розвитку. Проведений огляд показав, що напівпровідникові сенсори мають високу чутливість, але їх термін служби і висока робоча температура призводять до високих експлуатаційних витрат. Існуючі електрохімічні датчики по своїм характеристикам суттєво поступаються іншим розглянутим типам сенсорів.

Оптичні датчики широко представлені на ринку, мають широкий діапазон співвідношення ціни та якості в залежності від експлуатаційних потреб та термін служби понад 10 років. По своїм характеристикам сенсори виконані з використанням методу $NDIR$ найбільш перспективні для систем моніторингу якості повітря.

Ключові слова: сенсор, системи моніторингу повітря, автоматизація, надійність, діагностика.

Постановка проблеми. Розвиток промисловості суттєво збільшив кількість викидів шкідливих речовин у атмосферу, що суттєво впливає на стан екології, а отже і на здоров'я людей. Статистичні дослідження показали, що за останні двадцять років, кількість смертей, викликана шкід-

ливими викидами у повітря, збільшилась більше ніж в два рази [1]. На сучасних підприємствах, дотримання екологічної безпеки відповідно до існуючих міжнародних стандартів [2] є важливим завданням. Особливо це актуально для підприємств енергетичного комплексу, видобувної

та переробної промисловості, частка викиду у атмосферу шкідливих речовин яких складає до 90% від загальної кількості викидів в атмосферу.

Відповідно до [3, 4] найчастіше контролюють наявність і концентрацію у повітрі наступних речовин: оксиди азоту NO, NO₂, N₂O; монооксид вуглецю CO, вуглекислий газ (діоксид вуглецю) CO₂, оксид сірки SO₂, вуглеводневі гази (CH₄, C₂H₆, C₂H₄ та інші), тверді частки речовин у повітрі.

Рішення такої задачі, досягається за рахунок впровадження автоматизованих систем моніторингу якості повітря. Важливою складовою таких систем є газові сенсори, які дозволяють визначити наявність та концентрації шкідливих домішок у повітрі [3]. Використання різних, за принципом роботи, типів датчиків дозволяє значно розширити моніторинг даних в рамках різноманітних виробничих задач та процесів [5–6]. Для масового застосування сучасні датчики повинні бути дешевими, надійними, енергозберігаючими та мати значний термін працездатності. З оглядом на сучасні потреби виробництва, сенсори повинні мати можливість простого інтегрування в IoT системи.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Аналіз сучасних публікацій показав, що з кожним роком ринок сенсорів, які використовуються для визначення наявності шкідливих речовин у повітрі, збільшується і по прогнозам аналітиків на 2025 рік сягне одного трильйону доларів [4]. Відповідно до [3–8] перевага віддається датчикам з нижчим енергоспоживанням та з можливістю безпроводного включення у системи моніторингу повітря [4]. В роботах [9–13] приведені основні характеристики напівпровідникових газових сенсорів, зазначені їх переваги та недоліки та перспективи їх розвитку. Публікації [14–16] присвячені електрохімічним сенсорам, а [17–20] оптичним.

Усі розглянуті публікації не враховують те, що по своїм технічним характеристикам не всі датчики можуть бути впровадженні в системи моніторингу якості повітря. Тому актуальним є розгляд сучасних сенсорів контролю промислових викидів в контексті автоматизованих систем моніторингу якості повітря.

Постановка завдання. Мета цієї статті – огляд сучасних сенсорів, які використовуються для контролю промислових викидів в атмосферу в сучасних автоматизованих системах.

Виклад основного матеріалу. Принцип роботи сенсора впливає на перелік речовин, які він може визначати. Крім того, для оцінки ефективності методів виявлення газу слід враховувати наступні показники [7]:

- 1) чутливість: мінімальне значення об'ємної концентрації газів, при якій відбувається спрацювання сенсора;
- 2) селективність: можливість газових датчиків, з достатньою достовірністю, ідентифікувати конкретний газ серед газової суміші;
- 3) час спрацювання сенсору;
- 4) споживання енергії;
- 5) оборотність: чи можуть чутливі матеріали повернутися у вихідний стан після виявлення;
- 6) вартість виготовлення.

Класифікація сенсорів, що використовуються для контролю промислових викидів в атмосферу, в залежності від фізичного принципу покладеного в основу їх роботи, приведено в таблиці 1 [4, 8]. В даній класифікації враховані лише ті сенсори, яким притаманна оборотність.

Таблиця 1

Класифікація газових сенсорів

Тип сенсора	Принцип роботи	Викиди, які контролює
Напівпровідниковий	Використовують зміну електричного опору напівпровідника при взаємодії з газом	чадний газ (CO), метан (CH ₄), водень (H ₂), аміак (NH ₃)
Електрохімічний	Генерують електричний сигнал у відповідь на хімічну реакцію між газом та реагентом в сенсорі	токсичні гази, такі як CO, SO ₂ , NO ₂
Оптичний	Вимірюють зміни у світлових характеристиках, коли світло взаємодіє з газом	Можуть використовуватися для широкого спектру газів, залежно від налаштувань і типу оптичного методу

Напівпровідникові газові сенсори

Напівпровідникові газові сенсори широко використовуються для виявлення горючих та деяких токсичних газів у повітрі (горючий газ, природний газ, зріджений нафтовий газ, водень, озон, оксид вуглецю, аміак, бензол, сірководень, леткі органічні речовини (VOC)). Принцип дії напівпровідникових сенсорів заснований на зміні провідності чутливого шару сенсору, що відбувається за рахунок адсорбції молекул газу на його поверхні при взаємодії сенсора з аналізованим газовим середовищем [9–10]. В якості аналітичного вихідного сигналу використовують або опір чутливого елементу, або аналоговий сигнал напруги.

Сенсори отримали широке розповсюдження через простоту виготовлення. Їх конструкція включає підложку, на яку наносять вимірювальні

електроди, чутливий та нагріваючий елементи. Для забезпечення працездатності датчиків, необхідно нагрівати напівпровідниковий шар до температури 150–600 °С. Так для сенсорів з чутливим елементом виконаним на базі CdO/ZnO, максимальна чутливість до бутану досягається при температурі 300 °С [9]. Робочі характеристики сенсора залежать від матеріалу чутливого шару (хімічний склад, кристалічна будова, геометричні розміри, адсорбційно/десорбційні властивості, каталітична активність, термодинамічна стабільність), матеріалів та геометрії нагріваючого та вимірювального електродів.

В якості чутливого елемента і напівпровідникових газових сенсорів використовують [10]:

- 1) метал оксидні напівпровідникові матеріали (SnO₂, ZnO, та ін.);
- 2) двовимірні матеріали (графен);
- 3) вуглецеві нанотрубки (одновимірний матеріал);
- 4) напівпровідникові матеріали з широкою забороненою зоною (SiC, GaN).

На сьогоднішній день, близько 90% всіх напівпровідникових газових сенсорів виготовляється на основі метал оксидних напівпровідникових матеріалів.

Так як, взаємодія молекул газу із сенсором відбувається переважно на поверхні, а отже, кількість поверхневих атомів чутливого елемента відіграє у роботі датчика важливу роль, то перспективним є використання в конструкції сенсорів одновимірних та двовимірних матеріалів, у якості чутливого шару. Так з роботи [9] видно, що сенсори на основі наностержнів ZnO показали високу чутливість (10 ppm) та швидкий відгук на бензол та етанол. Крім того, використання таких матеріалів дозволяє не лише підвищити селективність та чутливість напівпровідникових газових сенсорів, а і суттєво знизити робочу температуру, що, в свою чергу, зменшує енергію споживання, а отже сприяє збільшенню довговічності датчиків. В таблиці 2 наведені деякі характеристики для сенсорів з чутливим елементом на основі вуглецевих нанотрубок.

Таблиця 2

Робочі характеристики напівпровідникових газових сенсорів з чутливим елементом на основі вуглецевих нанотрубок

Газ, який контролюється	Діапазон концентрацій газу	Робоча температура, °С	Література
CO	10–50 ppm	150	[11]
NH ₃	60–800 ppm	25	[12]
NO ₂	0.01–10 ppm	25	[13]

До переваг напівпровідникових сенсорів відносять:

- можливість виявлення низьких концентрацій шкідливих речовин (<ppm),
- швидкодія,
- мініатюрні розміри,
- низька вартість,
- простота виготовлення.

Основним недоліком даного типу сенсорів є їх низька селективність, що обмежує області їх застосування в автоматизованих системах.

Електрохімічні сенсори

Електрохімічні датчики широко використовуються для виявлення токсичних газів, таких як CO, H₂, SO₂ і інших. Їх широке розповсюдження в автоматизованих системах контролю моніторингу якості повітря обумовлено низьким енергоспоживанням, коротким часом реагування (відгуку), високою чутливістю до певного компонента середовища та широким діапазоном визначення концентрацій [4]. При стандартних умовах експлуатації (робоча температура 25°С та тиск навколишнього середовища в межах 20% від стандартного) термін служби електрохімічного датчика становить приблизно один рік [9].

Узагальнена схема електрохімічного сенсора приведена на рис. 1.

По суті, електрохімічні датчики представляють собою герметичний корпус, всередині якого розміщені два або три електроди (опорний, робочий, допоміжний) та іонний провідник між ними (рис. 1). Вимірювальний електрод відповідає за проведення окислювально-відновлювальної реакції, яка відбувається на його поверхні [15]. Потенціал вимірювального електрода щодо допоміжного визначається електронним пристроєм. Величина потенціалу вибирається таким чином, щоб забезпечити оптимальний режим протікання електрохімічної реакції речовини, що визначається. На допоміжному електроді, зазвичай, протікає реакція електровідновлення кисню повітря. Струм, який при цьому виникає пропорційний концентрації газу, що аналізується.

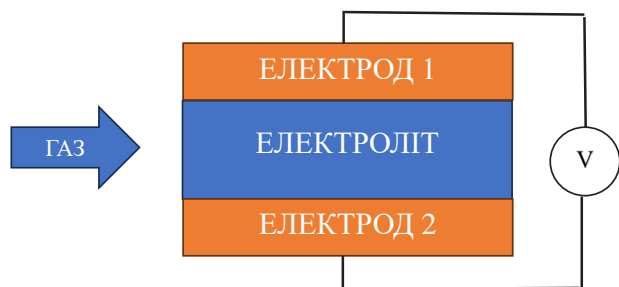


Рис. 1. Узагальнена схема електрохімічного сенсора

В електрохімічному сенсорі з двома електродами, допоміжний електрод виконує одночасно і функцію порівняльного електроду. Така конструкція дозволяє суттєво знизити затрати на виробництво сенсорів.

Для детектування двох газів одночасно, розроблені газові електрохімічні сенсори з чотирма електродами [16].

Для забезпечення селективності датчика до обраного компоненту, необхідно застосовувати фільтри, які найчастіше розташовують у кришці сенсора. Вибір фільтра визначається умовами (складом аналізованого газового середовища), в яких працюватиме електрохімічні сенсори. Наприклад, для визначення CO датчик забезпечують фільтром, що поглинає NO₂, SO₂, H₂S.

В сенсорах використовують інертні, хімічно активні чи модифіковані, і навіть іоноселективні електроди. Електроліти можуть бути рідкими (розчини H₂SO₄) або твердими (ZrO₂, Al₂O₃, CsHSO₄ та ін.).

В залежності від способу вимірювання корисного сигналу електрохімічні сенсори бувають двох типів:

1. Амперометричні – вимірюється струм, що виникає від дії потенціалу прикладеного до вимірювальної комірки сенсора. Сила струму пропорційна концентрації вимірювального газу. До переваг відносять високу точність вимірювання. Недоліки: недовговічність, малий діапазон вимірювальних концентрацій, високе енергоживлення, залежність вимірювального сигналу від розмірів поверхні, де відбувається окислювально-відновлювальна реакція.

2. Потенціометричні – електрохімічний ланцюг, в якому наявність вимірювального компоненту в газовій суміші викликає зміну різниці потенціалів між робочим електродом та електродом порівняння. Переваги: не потребує зовнішнього джерела живлення; не залежить від розмірів електродів, що дозволяє суттєво зменшити їх розміри; широкий діапазон вимірювальних концентрацій (3–4 порядки); оборотність реакції. Недоліки: невисока точність вимірювання.

На сьогоднішній день досить широко застосовуються в системах моніторингу якості повітря, за рахунок високої вибірковості, чутливості, можливості визначення хімічних компонентів в широкому діапазоні значень, швидкодії, стабільній роботі сенсора при низьких концентраціях вимірювального газу. До недоліків слід віднести: неповна селективність до вимірюваного компоненту; зменшення чутливості з часом; більшість

датчиків не можуть працювати в середовищі без кисню; сильна температурна залежність та чутливість до атмосферного тиску; не можуть працювати при низьких температурах (нижче 30 °C); на ресурс впливає сумарний час впливу вимірювального газу.

Оптичні газові сенсори

Основна перевага оптичних газових сенсорів полягає в безконтактному способі визначення концентрації детектованого газу. Відповідно до класифікації приведеної в роботі [17] можна виділити три основні методи, які використовують в датчиках: флуоресцентний, адсорбційний та комбінаційного розсіювання.

Найбільш широке поширення в наш час одержали оптичні сенсори, які реалізують адсорбційний оптичний метод, а саме недисперсійний інфрачервоний метод (NDIR) [14, 17, 18, 19]. Це обумовлено тим, що такі датчики забезпечують: високу чутливість, стабільність робочих характеристик на протязі довгого періоду часу, короткий час відгуку, селективність до обраного газу.

Робота NDIR датчиків ґрунтується на законі поглинання Ламберта-Бера і полягає в реєстрації зміни інтенсивності випромінювання, що взаємодіє з досліджуванним газом на деяких характерних для нього довжинах хвиль. Виділення робочого діапазону довжин хвиль із широкосмугового спектру випромінювача здійснюється за допомогою інтерференційних фільтрів або за рахунок використання дискретного випромінювання на певній довжині хвилі.

В таблиці 3 наведено довжини хвиль, що характерні для деяких газів.

Таблиця 3
Довжини хвиль поглинання газів

Газ	Довжина хвилі поглинання (мкм)	Довжина хвилі, яка зазвичай використовується в сенсорах (мкм)	Література
NO ₂	4,51~4,56	4,52	[20]
SO ₂	4,0~4,17; 7,25~7,5	7,3	[19]
CO ₂	2,75~2,8; 4,26~4,3	4,27	[19]
NO	5,24~5,28	5,25	[20]
CO	4,5~4,7	4.66	[19]

Основними конструктивними елементами оптичного інфрачервоного сенсора є: джерело та приймач випромінювання, робоча камера, селективний фільтр та плата обробки сигналу. Найчастіше використовують двоканальну схему

вимірювання із застосуванням вимірювального та опорного (порівняльного) каналів.

Відсутність прямого контакту газової суміші з джерелом та приймачем випромінювання оптичних сенсорів дозволяє використовувати їх в агресивних середовищах. Датчики здатні працювати в температурному діапазоні від -60 до $+85^{\circ}\text{C}$, що суттєво розширює область використання. Однією з основних переваг сенсорів виготовлених на основі оптичного методу NDIR є їх тривалий термін служби, який становить понад 10 років [14].

До недоліків відносять:

1) проблеми з селективністю, які виникають через завади від прилеглих газів;

2) підвищена вартість через дуже складні оптичні компоненти.

На основі проведеного аналізу, можна зробити висновок, що відсоток використання оптичних сенсорів в системах моніторингу якості повітря щороку збільшується. Розвиток даного типу датчиків направлено у бік мінімізації габаритних розмірів, здешевлення оптичних схем та зменшення енергоспоживання.

Як видно, розглянуті типи газових сенсорів мають, як переваги, так і недоліки. В таблиці 4 наведено порівняння їх основних характеристик в чотирьох бальній системі оцінювання: 4 – відмінно; 3 – добре; 2 – задовільно; 1 – погано.

З даних приведених в таблиці 4, можна зробити висновок, що перспективним для систем моніторингу якості повітря є використання оптичних сенсорів, які мають більш високу довговічність, точність, селективність та чутливість в порівнянні з напівпровідниковими та електрохімічними сенсорами. Хоча з точки зору собівартості та часу відгуку кращі характеристики мають напівпровідникові датчики. Крім того при виборі сенсорів слід комплексно оцінювати технічні характеристики кожного з сенсорів і обирати найбільш оптимальний варіант в кожній конкретній задачі.

Висновки. Використання автоматизованих систем моніторингу шкідливих викидів в атмосфері є дуже важливим завданням. Моніторинг

Таблиця 4

Порівняння характеристик напівпровідникових, електрохімічних та оптичних газових сенсорів

Параметр	Тип газового сенсору		
	Напів-провідниковий	Електрохімічний	Оптичний
чутливість	4	3	4
точність	3	3	4
селективність	2	3	4
час відгуку	4	2	2
стабільність	4	1	4
довговічність	3	2	4
ціна	4	3	2
розміри	4	3	4
моніторинг у реальному часі	3	1	4

у реальному часі вимагає ефективної системи датчиків, що забезпечують безперервне зчитування даних контролю без збільшення експлуатаційних витрат. Ринок газових сенсорів достатньо різноманітний, але проведений огляд показав, що найчастіше в таких системах використовують три типи сенсорів: напівпровідникові, електрохімічні та оптичні, тому що по своїм технічним характеристикам (ціна, надійність, енергоспоживання, чутливість, оборотність та інше) вони більш перспективні.

Проведений огляд показав, що напівпровідникові сенсори мають високу чутливість, але їх термін служби і висока робоча температура призводять до високих експлуатаційних витрат. Існуючі електрохімічні датчики по своїм характеристикам суттєво поступаються іншим розглянутим типам сенсорів.

Оптичні датчики широко представлені на ринку, мають широкий діапазон співвідношення ціни та якості в залежності від експлуатаційних потреб та термін служби понад 10 років. По своїм характеристикам сенсори виконані з використанням методу NDIR найбільш перспективні для систем моніторингу якості повітря.

Список літератури:

1. Fuller R, Landrigan PJ, Balakrishnan K, et al. Pollution and health: a progress update. *Lancet Planetary Health*. 2022. № 6. P. 535–547. DOI: 10.1016/S2542-5196(22)00090-0
2. ДСТУ ISO 14001:2015 Системи екологічного управління. Вимоги та настанови щодо застосування (ISO 14001:2015, IDT) [Чинний від 01.07.2016]. Вид. офіц. Київ, 2016. 30 с.
3. Богдан Г.А., Глущенко М.О. Загальні тенденції побудови автоматизованих систем моніторингу якості повітря на промислових підприємствах *Вчені записки ТНУ імені В.І. Вернадського. Серія: Технічні науки*. 2023. Том. 34 (73), № 4. С. 12–17. DOI: 10.32782/2663-5941/2023.4/03
4. Shivani Dhall, B.R. Mehta, A.K. Tyagi, Kapil Sood, A review on environmental gas sensors: Materials and technologies. *Sensors International*. Volume 2, 2021, ISSN 2666-3511, DOI: 10.1016/j.sintl.2021.100116.

5. Mohd Javaid, Abid Haleem, Ravi Pratap Singh, Shanay Rab, Rajiv Suman, Significance of sensors for industry 4.0: Roles, capabilities, and applications. *Sensors International*. Volume 2, 2021, ISSN 2666-3511, DOI: 10.1016/j.sintl.2021.100110.
6. Kalsoom, Tahera & Ramzan, Naeem & Ahmed, Shehzad & Ur Rehman, Masood. Advances in Sensor Technologies in the Era of Smart Factory and Industry 4.0. *Sensors*. 2020. 20. 6783. DOI: 10.3390/s20236783
7. Liu, Xiao & Cheng, Sitian & Liu, Hong & Hu, Sha & Zhang, Daqiang & Ning, Huansheng. A Survey on Gas Sensing Technology. *Sensors (Basel, Switzerland)*. 2012. 12. 9635-65. DOI:10.3390/s120709635.
8. Осадчук В.С., Осадчук О.В., Дудник Д.П. Методи вимірювання концентрації газів. *Вісник Хмельницького національного університету. Серія "Технічні науки"*. 2011. № 6. С. 55-58.
9. Goel, Neeraj & Kunal, Kishor & Kushwaha, Aditya & Kumar, Mahesh. Metal oxide semiconductors for gas sensing. *Engineering Reports*. 2022. 5. DOI: 10.1002/eng2.12604
10. Raju, Parameswari & Li, Qiliang. Review—Semiconductor Materials and Devices for Gas Sensors. *Journal of The Electrochemical Society*. 2022. 169. DOI: 10.1149/1945-7111/ac6e0a.
11. E.H. Espinosa, R. Ionescu, B. Chambon, G. Bedis, E. Sotter, C. Bittencourt, A. Felten, J.-J. Pireaux, X. Correig, E. Llobet, Hybrid metal oxide and multiwall carbon nanotube films for low temperature gas sensing. *Sensors and Actuators B: Chemical*. 2007. Volume 127, Issue 1. Pages 137-142, ISSN 0925-4005, DOI: 10.1016/j.snb.2007.07.108.
12. Hieu, Nguyen & Thuy, Luong & Chien, Nguyen. Highly sensitive thin film NH₃ gas sensor operating at room temperature based on SnO₂/MWCNTs composite. *Sensors and Actuators B: Chemical*. 129, 2008, Pages 888-895. DOI:10.1016/j.snb.2007.09.088
13. Gaikwad S., Bodkhe G., Deshmukh M., Rushi A., Shirsat M.D. Chemiresistive sensor based on polythiophene-modified single-walled carbon nanotubes for detection of NO₂. *Modern Phys. Lett. B*. 2015. V. 29. № 6. DOI:10.1142/S0217984915400461
14. Cepa JJ, Pavón RM, Caramés P, Alberti MG. A Review of Gas Measurement Practices and Sensors for Tunnels. *Sensors (Basel)*. 2023 Jan 17;23(3):1090. DOI: 10.3390/s23031090.
15. Wenjian, Zhang & Chen, Xinyi & Xing, Yingying & Chen, Jingqiu & Guo, Lanpeng & Huang, Qing & Li, Hua-Yao & Liu, Huan. Design and Construction of Enzyme-Based Electrochemical Gas Sensors. *Molecules*. 29. 5. 2023. DOI:10.3390/molecules29010005
16. Baron, Ronan & Saffell, John. Amperometric Gas Sensors as a Low Cost Emerging Technology Platform for Air Quality Monitoring Applications: A Review. *ACS Sensors*. 2017. DOI: 10.1021/acssensors.7b00620
17. Козубовський В. Р. Оптичні прилади газового аналізу для контролю забруднення атмосферного повітря (огляд). *Науковий вісник Ужгородського університету : Серія: Фізика*. 2009. Вип. 26. С. 61–87.
18. Popa, D.; Udrea, F. Towards Integrated Mid-Infrared Gas Sensors. *Sensors* 2019, 19, 2076. DOI:10.3390/s19092076
19. Xiao, Ning & Li, Weichao & Tian, Yuewei & Wang, Weijun & Yuan, Chao. Infrared Gas Sensor Based on MEMS Technology for Gas Detection. *Journal of Physics: Conference Series*. 2024. 2785. 012103. DOI:10.1088/1742-6596/2785/1/012103.
20. Wojtas, Jacek & Mikolajczyk, Janusz & Bielecki, Zbigniew. Aspects of the Application of Cavity Enhanced Spectroscopy to Nitrogen Oxides Detection. *Sensors (Basel, Switzerland)*. 2013. 13. DOI: 7570-98. 10.3390/s130607570.

Bohdan H.A., Hlushchenko M.O. CURRENT STATUS AND FUTURE PROSPECTS OF GAS SENSORS

Industry development has significantly increased harmful emissions into the atmosphere, adversely affecting the environment and human health. This highlights the urgent need for automated air quality control systems in enterprises within the energy complex and mining and processing industries, where harmful substance emissions can account for up to 90% of total atmospheric emissions. The list of deleterious substances subject to mandatory control is extensive and includes nitrogen oxides (NO, NO₂, N₂O), carbon monoxide (CO), carbon dioxide (CO₂), sulfur oxides (SO₂), hydrocarbon gases (such as CH₄, C₂H₆, C₂H₄), and solid particles in the air.

Consequently, air quality monitoring systems must be equipped with a comprehensive array of sensors capable of detecting the presence of these substances. The use of various types of sensors, each operating on different principles, significantly enhances data monitoring across a range of production tasks and processes. For mass application, modern sensors must be affordable, reliable, energy-efficient, and have a long service life.

This article examined the main types of sensors based on the physical principles underlying their operation. It was also determined that an adequate assessment of the effectiveness of gas detection methods should take into account indicators such as sensitivity, selectivity, operation time, energy consumption, reversibility, and production cost. It was established that among the reversible gas sensors, semiconductor, electrochemical, and optical sensors are the most commonly used in air quality monitoring systems.

The article examines the advantages and disadvantages of each type of sensor, along with their areas of application and development prospects. The review indicated that semiconductor sensors exhibit high sensitivity; however, their limited service life and high operating temperatures contribute to increased operating costs. Based on their characteristics, existing electrochemical sensors are significantly inferior to the other types of sensors considered.

Optical sensors are widely represented on the market, offering a broad range of price-to-quality ratios depending on operational needs, with a service life exceeding 10 years. Given their characteristics, sensors utilizing the NDIR method are the most promising option for air quality monitoring systems.

Key words: sensor; air monitoring systems, automation, reliability, diagnostics.

Волк М.О.

Харківський національний університет радіоелектроніки

Бугрій А.М.

Харківський національний університет радіоелектроніки

Ковтун Є.І.

Харківський національний університет радіоелектроніки

Брестовицький Р.М.

Харківський національний університет радіоелектроніки

Соробей Б.В.

Харківський національний університет радіоелектроніки

Лобач Я.В.

Харківський національний університет радіоелектроніки

ОПТИМІЗАЦІЯ РЕСУРСІВ У ХМАРНИХ ОБЧИСЛЕННЯХ: ГІБРИДНИЙ ПІДХІД ДО АВТОМАТИЗАЦІЇ ОПЕРАЦІЙ ТА ЕНЕРГОЗБЕРЕЖЕННЯ

У статті досліджено методи управління ресурсами в хмарних системах з акцентом на оптимізацію обчислювальних процесів і автоматизацію операцій. Основна мета дослідження полягає в розробці ефективних підходів до управління ресурсами, які забезпечать надійність, масштабованість та мінімізацію енергоспоживання в умовах зростаючого навантаження на інформаційні системи. Хмарні обчислення на сьогодні є важливою технологією, яка надає організаціям можливість динамічного менеджменту ресурсів для досягнення максимального результату з мінімальними витратами. У роботі описано сучасні архітектурні рішення, що дозволяють впроваджувати хмарні технології та використовувати багаторівневі стратегії для оптимізації роботи систем. Запропоновано нові підходи до управління віртуальними машинами та розподілу ресурсів, які ґрунтуються на принципах балансування навантаження та динамічного масштабування ресурсів відповідно до обчислювальних потреб. Також проведено порівняння різних моделей управління розподіленими обчисленнями, таких як централізована та децентралізована архітектури.

Експериментальне моделювання показало високу ефективність запропонованих підходів у реальних хмарних системах, зокрема в умовах різного навантаження, гетерогенних структур та обмеженості ресурсів. Результати симуляцій продемонстрували, що запропоновані алгоритми розподілу ресурсів знижують затримки, покращують продуктивність та зменшують витрати енергії. Отримані результати підтверджують, що запропоновані методи та архітектурні рішення можуть бути використані для розгортання масштабованих хмарних систем, які забезпечують високу ефективність та надійність. У висновках роботи визначено перспективні напрями подальших досліджень, зокрема впровадження нових алгоритмів для покращення управління ресурсами в багатохмарних середовищах.

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

Постановка проблеми. За минулі десятиріччя в інформаційно-комунікаційних технологіях відбулися значні зміни парадигми від ізольованих і обмежених комп'ютерів та локальних мереж до середовищ хмарних обчислень. З розвитком інформаційно-комунікаційних технологій, обсяг даних,

що обробляється в хмарних системах, невпинно зростає. Це призводить до значного навантаження на хмарні ресурси та підвищує вимоги до продуктивності, масштабованості та надійності обчислень. Хмарні системи стали ключовим елементом інфраструктури в багатьох сферах, включаючи

науку, медицину, фінанси та бізнес. Однак збільшення кількості користувачів і запитів на обчислювальні потужності створює нові виклики для ефективного управління ресурсами.

Традиційні підходи до управління ресурсами, які використовують статичне розподілення ресурсів, не можуть забезпечити достатньої гнучкості для вирішення задач динамічного балансування навантаження в умовах постійних змін у мережі. Зокрема, проблема полягає в тому, що при збільшенні кількості запитів зростає ймовірність затримок, що призводить до зниження якості обслуговування та зростання енергоспоживання.

Таким чином, постає завдання розробки нових моделей і підходів до управління ресурсами, які зможуть вирішити проблему динамічного розподілу обчислювальних потужностей з урахуванням навантаження на систему, енергетичних витрат та вимог до якості обслуговування.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Дослідження в галузі хмарних обчислень за останні роки значно просунулися вперед, зосереджуючись на розробці більш гнучких та масштабованих архітектур для розподілу ресурсів. Багато авторів [1] підкреслюють важливість централізованих систем управління, де головний контролер відповідає за розподіл ресурсів між вузлами. Однак такі системи мають обмеження з точки зору масштабованості та стійкості до збоїв.

Інші дослідники [2] розглядають децентралізовані підходи, в яких кожен вузол автономно вирішує, як використовувати свої ресурси. Це дає змогу значно підвищити масштабованість системи, однак виникає проблема координації між вузлами, що може призвести до неефективного розподілу ресурсів. У дослідженнях [3] зроблено спробу об'єднати обидва підходи, пропонуючи гібридні системи управління, які поєднують переваги централізації та децентралізації.

Також слід зазначити, що важливе місце у сучасних дослідженнях займають питання енергозбереження. Використання ресурсів із низьким енергоспоживанням стало одним із ключових напрямків оптимізації хмарних систем. У роботах [4] пропонуються алгоритми управління ресурсами, що враховують енергетичну ефективність системи та намагаються зменшити енергоспоживання без втрати продуктивності.

Постановка завдання. Метою цієї статті є аналіз сучасних підходів до управління ресурсами у хмарних системах та розробка нового гібридного підходу, що дозволяє поєднувати переваги централізованого і децентралізованого

управління. Це допоможе вирішити проблему масштабованості і ефективного розподілу ресурсів в умовах високого навантаження на систему.

Крім того, стаття спрямована на розробку методів автоматичного балансування навантаження і оптимізації енергоспоживання в хмарних середовищах. У результаті буде запропоновано новий алгоритм, який дозволить зменшити затримки в обробці запитів, підвищити продуктивність системи та зменшити енергетичні витрати.

Виклад основного матеріалу. Гібридний підхід, запропонований у цій статті, поєднує централізоване та децентралізоване управління ресурсами, забезпечуючи більш гнучкий та адаптивний розподіл обчислювальних завдань. Централізоване управління забезпечує загальну координацію і балансування навантаження в системі, тоді як децентралізовані вузли приймають локальні рішення про розподіл ресурсів залежно від поточного навантаження.

Зокрема, центральний контролер відповідає за розподіл великих обчислювальних завдань між основними вузлами системи, тоді як менші завдання можуть бути оброблені децентралізованими вузлами. Це дозволяє зберігати гнучкість системи і мінімізувати затримки. Також було впроваджено механізм передачі завдань між вузлами, що дозволяє ефективно управляти навантаженням навіть при великій кількості запитів.

Пропонуємо структуру, яка складається з трьох сегментів у хмарі (декількох хмар) для розподілу та управління ресурсами. В процесі роботи докато, що мультихмарне середовище може бути розширене на рівні провайдерів хмарних послуг для надання спеціалізованих сервісів, пов'язаних з управлінням хмарними середовищами. Провайдер хмарних сервісів переважно надає ресурси в конкретній конфігурації, наприклад, приватній, загальнодоступній або гібридній. Інший постачальник ресурсів, в той же час, може мати фізичні ресурси та розширює об'єкти для інших провайдерів ресурсів. Кінцевий користувач – це третій учасник процесу, який, за замовчуванням, працює в багатохмарному середовищі.

Провайдер ресурсів має обчислювальні потужності, сховища даних та комунікаційну мережу. Ці три типу ресурсів надаються користувачеві через віртуалізоване середовище, віртуальні машини, контейнери та інші засоби, якими володіють провайдери хмарних сервісів. Сервіси надаються на фізичних та віртуальних ресурсах відповідно до певної стратегії.

Згідно нашої структури існує дев'ять кроків для забезпечення параметрів якості обслуговування

щодо ефективного розподілу ресурсів у хмарній системі. На першому кроці запит від клієнта надсилається на сервер у віртуальному середовищі. Задасться конфігурація та налаштування програм тестування згідно з цілями якості обслуговування у віртуальному середовищі. На другому кроці сформований запит надсилається до брокера кластера для виконання службами хмари через різні конфігурації з параметрами якості обслуговування, як показано на рис. 1. Параметри якості обслуговування включають початкову конфігурацію, тестові логічні програми та реалізують одну з стратегій управління. На етапах 4, 5 і 6 модель тестового варіанту аналізуються при умовах різних конфігурацій. Виконується перевірка виконання умов якості обслуговування. На сьомому кроці, якщо параметри якості обслуговування задовільні, виконується надання ресурсу з пулу ресурсів. Починаючи з восьмого кроку, виконується моніторинг та реалізується бізнес-логіка передачі завдання у віртуальне середовище. Після виконання, всі результати та витрати передаються клієнту.

Запропонована вище структура враховує три основні параметри для забезпечення якості обслуговування і розподілу ресурсів у хмарному середовищі. Ці параметри прийнято по результатам аналізу літератури та різних хмарних моделей, зокрема варіантів комерційних хмарних середовищ. Ця архітектура базується на використанні трьох параметрах для забезпечення процесів та логіки динамічного та швидкого розподілу ресурсів із покращенням якості обслуговування у багатохмарному середовищі.

Відзначимо, що описана структура сконцентрована на трьох параметрах, які необхідні для

проекування будь-якої мультихмари. Перший параметр – це співпраця, яка є ключовим елементом оптимізації та спільного використання ресурсів. Багатохмарність – це взаємодія різних сервісів від базових провайдерів хмарних сервісів. Високий рівень неоднорідності від архітектурного до сервісного рівня робить цей параметр основним, а в деяких випадках – вирішальним. Цей параметр може комплексно використовувати такі підпараметри, як стимули та стратегії. Остання деталізація цих параметрів пов'язана з вартістю, соціальними та публічними факторами життєдіяльності та ефективністю угод по наданню послуг. До речі, ці ключові параметри є критично важливими для розподілу ресурсів із очевидним порогом якості надання послуг.

Для оцінки ефективності цього підходу було проведено експериментальне моделювання за кількома сценаріями навантаження. Під час тестування було використано такі показники, як затримка обробки запитів, використання процесорів, енергоспоживання та масштабованість системи. Результати показали, що запропонована модель дозволяє досягти значного зменшення затримок у порівнянні з іншими підходами, зокрема завдяки більш ефективному управлінню ресурсами.

Запропоновану архітектуру було промодельоване за допомогою симулятора з відкритим кодом CloudSim. Він надає набір різноманітних інструментів для моделювання середовищ хмарних обчислень з різними параметрами якості обслуговування, оптимізації та конфігурування. Під час проведення експериментів було створено три компоненти середовища, а саме мультихмару з децен-



Рис. 1. Структура та порядок надання послуг у хмарній системі

тралізованим управлінням, брокер ресурсів та менеджер хмарних ресурсів. Децентралізована система управління була спрямована на імітацію віртуального середовища, віртуальних машин та спільного використання комунікаційного віртуального простору. Брокер ресурсів розподіляє робоче навантаження за віртуальними машинами та запитує динамічний перерозподіл ресурсів для забезпечення якості обслуговування. Децентралізований менеджер хмарних ресурсів виконує запити та повертає результати обчислень відповідно до кінцевого користувача, використовуючи комунікаційні засоби віртуального середовища.

Провайдери хмарних послуг стягують з користувачів плату, по стратегії за використання, за оказані послуги, тому оцінити вартість використання хмари для безкоштовних експериментів складно. Тому експериментальні дослідження, які проводилися для хмари, в основному виконувалися за допомогою симуляторів хмари. В цьому дослідженні для моделювання великомасштабних хмарних обчислень за допомогою віртуального сервера та створення індивідуальної віртуальної машини використовувалось середовище CloudSim. Також, це програмне забезпечення використовувалось для оцінки моделей із стратегіями зі змінами робочого навантаження та розподіленими центрами обробки даних.

Програмне забезпечення CloudSim не містить графічний інтерфейс користувача (GUI), але надає можливість взаємодії з різноманітними інтегрованими середовищами розробки (IDE), наприклад, з Eclipse та NetBeans. В наших експериментах для симуляції було використано CloudSim з Eclipse. Конфігурація середовища CloudSim використо-

вує хмарні програми, хости, віртуальні машини і дозволяє створювати рандомні умови для імітації різних стратегій та конфігурацій на різних віртуальних машинах. У якості додаткового програмного забезпечення було використано Apache Tomcat 9.0.95, DSpace 6.3, PostgreSQL 13.16.

В процесі симуляції було оцінено різні конфігурації в умовах різних налаштувань хмари, щоб переконатися в достовірності параметрів, які згадані у структурі, що запропонована, а саме оптимізації, співпраці та спільного використання. Усі параметри представляють якість обслуговування. Віртуальні машини було рандомізовано з наявними п'ятьма пристроями для забезпечення різних конфігурацій. Процес моделювання активувався з мінімальними параметрами замість використання великої кількості обчислювальних ресурсів. Це було зроблено для зрозуміння умов робочого навантаження та ймовірностей збоїв. Віртуальні машини мали 1 ГБ пам'яті.

Було реалізовано безперервне моделювання, в процесі якого реалізовано сплеск параметрів якості обслуговування, який досяг максимального значення та знову почав знижуватися, як показано на рис. 2 а). На графіку представлено нормовані значення параметрів якості обслуговування (QoS). Експеримент показав, що параметри децентралізованої мультихмари з використанням звичайного брокера та стандартною конфігурацією коливаються щодо якості обслуговування та ресурсної потужності. В випадку, коли ємність ресурсів хмари починає вичерпуватися, якість обслуговування починає знижуватися, і жодні вбудовані протоколи оптимізації не виправляють ситуацію. Симулятор використовував динамічну зміну пара-

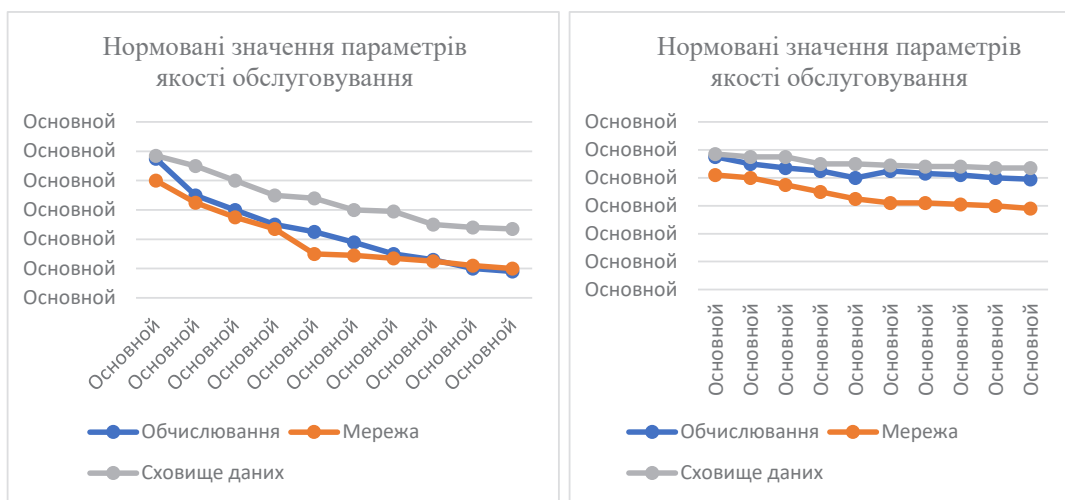


Рис. 2. Забезпечення QoS а) без оптимізації, б) з оптимізацією

метрів для створення децентралізованої мульти-хмари при різних сценаріях управління.

В процесі другого циклу моделювання з параметрами попереднього експерименту, але з використанням запропонованої структури та аналізу моделей відповідних параметрів якості обслуговування, які обговорювались раніше, було отримано результати, що представлені на рисунку на рис. 2 б). В процесі симуляції було використано ті ж самі три модулі, тобто децентралізовану мультихмару, брокера та менеджера навантаження. З результатів можна зробити висновки, що запропоновані рішення забезпечують стабільну підтримку параметрів якості обслуговування з збільшенням навантаження на хмарну систему.

Вплив запропонованої оптимізації також було проаналізовано за параметрами відмови від обслуговування, фінансової співпраці, продуктивності. Вплив оптимізації, який спостерігався в попередньому експерименті на розподіл ресурсів, також відобразився на збільшенні співпраці з різними стратегіями управління, трафіку взаємодії розподілених модулів, що забезпечують постачальники ресурсів.

Крім того, було встановлено, що система демонструє високу стійкість до перевантажень, оскільки здатна автоматично перенаправляти

запити між вузлами залежно від їхньої поточної завантаженості. Це дозволило досягти значного зменшення енергоспоживання, оскільки завдання автоматично перенаправлялися до вузлів із нижчим енергоспоживанням у випадках, коли не було необхідності використовувати високопродуктивні процесори.

Висновки. Запропонований у статті гібридний підхід до управління ресурсами у хмарних системах дозволяє значно підвищити ефективність використання обчислювальних потужностей, мінімізувати затримки та оптимізувати енергоспоживання. Використання поєднання централізованого і децентралізованого управління забезпечує гнучкість і надійність системи, дозволяючи швидко адаптуватися до зміни умов навантаження.

Результати експериментального моделювання підтвердили, що запропонований підхід є перспективним для застосування в умовах високих навантажень, де важливо забезпечити баланс між ефективністю роботи та енергозбереженням. Подальші дослідження можуть бути спрямовані на розробку нових алгоритмів балансування навантаження, зокрема для багатохмарних середовищ, а також на вдосконалення механізмів автоматизації управління операціями у хмарних інфраструктурах.

Список літератури:

1. Shi, Dustdar S. The promise of edge computing. *Computer*, vol. 49. no. 5. 2016. pp. 78–81. DOI: 10.1109/MC.2016.145
2. Bonomi F., Milito R., Zhu J., Addepalli S. Fog computing and its role in the Internet of things. *Proceedings of the first edition of the MCC workshop on Mobile cloud computing*. ACM, 2012, pp. 13–16. <https://doi.org/10.1145/2342509.234251>
3. Bellavista P., Foschini L., Scotece D. Converging mobile edge computing, fog computing, and IoT quality requirements. *Future Internet of Things and Cloud (FiCloud)*, 2017 IEEE 5th International Conference on. IEEE, 2017, pp. 313–320. DOI: 10.1109/FiCloud.2017.55
4. Han S. N., Lee G. M., Crespi N., Van Luong N., Heo K., Brut M., Gatellier P. Dpwsim: A simulation toolkit for IoT applications using devices profile for web services. *Internet of Things (WF-IoT)*, 2014 IEEE World Forum on. IEEE, 2014, pp. 544–547. DOI: 10.1109/WF-IoT.2014.6803226
5. Mamchych O., Volk M. A unified model and method for forecasting energy consumption in distributed computing systems based on stationary and mobile devices. *Radioelectronic and Computer Systems*, [S.l.], v. 2024, n. 2, p. 120-135. DOI: <https://doi.org/10.32620/reks.2024.2.10>
6. Heilig L., Lalla-Ruiz E., Vob S. Modeling and solving cloud service purchasing in multi-cloud environments. *Expert System Application*, vol. 147, no. 3. 2020. pp. 113165. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2019.113165>
7. Filimonchuk T., Volk M., Ruban I., Tkachov V. Development of information technology of tasks distribution for grid-systems using the GRASS simulation environment. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. Information and controlling system*, 2016. Vol. 3/9 (81). pp. 45–53. DOI: 10.15587/1729-4061.2016.71892
8. Волк М.О., Курочкін В. С., Запорожченко А.П., Паронікян П.А. Гібридний метод розподілу ресурсів в хмарних системах. *Системи управління, навігації та зв'язку*, 2024, випуск 2(76), с. 70–83. DOI:10.26906/SUNZ.2024.2.070.
9. Волк М.О., Поповкін М. М. Методи моделювання масштабованих хмарних ресурсів. *Системи управління, навігації та зв'язку*, 2024, випуск 3(77), с. 56–59. DOI:10.26906/SUNZ.2024.2.070.

Volk M.O., Buhrii A.M., Kovtun Ye.I., Brestovytskyi R.M., Sorobey B.V., Lobach Ya.V.
**MODELS OPTIMIZATION OF RESOURCES IN CLOUD COMPUTING: A HYBRID
APPROACH TO AUTOMATION OF OPERATIONS AND ENERGY SAVING**

The article examines resource management methods in cloud systems, emphasising optimising computing processes and automating operations. The main goal of the research is to develop practical approaches to resource management that will ensure reliability, scalability and minimisation of energy consumption in conditions of increasing load on information systems. Today's cloud computing is an important technology that allows organisations to manage resources dynamically to achieve maximum results with minimum costs. The work describes modern architectural solutions that will enable the implementation of cloud technologies and the use of multi-level strategies to optimise the operation of systems. New approaches to virtual machine management and resource allocation are proposed based on load-balancing principles and dynamic scaling of resources according to computing needs. A comparison of different management models of distributed computing, such as centralised and decentralised architectures, is also made.

Experimental simulations have shown the high efficiency of the proposed approaches in natural cloud systems, particularly in conditions of different loads, heterogeneous structures and limited resources. Experiments were conducted using open-source software. Simulation results demonstrated that the proposed resource allocation algorithms reduce delays, improve performance, and reduce energy consumption. The results confirm that the proposed methods and architectural solutions can be used to deploy scalable cloud systems, particularly heterogeneous ones, which provide high efficiency and reliability under static and dynamic loads. The conclusions of the work identify promising directions for further research, particularly the introduction of new algorithms to improve resource management in multi-cloud environments.

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

Волошин В.С.

Національний університет водного господарства та природокористування

Опанасюк М.Ю.

Національний університет водного господарства та природокористування

ІННОВАЦІЙНІ ПІДХОДИ ДО РОЗРОБКИ СЕРВЕРНОЇ ЧАСТИНИ WEB-ЗАСТОСУНКУ КОНТРОЛЮ БЮДЖЕТУ ДОМОГОСПОДАРСТВА З ВИКОРИСТАННЯМ EXPRESS

У статті досліджено питання розробки серверної частини Web-застосунку для контролю бюджету домогосподарства, з акцентом на інноваційні підходи та використанням сучасних Web-технологій. Проаналізовано предметну область для визначення основних вимог користувачів і тенденцій у сфері управління фінансами. У статті розглянуто існуючі рішення, такі як *Mint Expense Tracker*, *You Need A Budget* та *Rocket Guard*, що автоматизують процеси відстеження витрат і бюджетування, виступають основою для формування власних ідей. Встановлено, що найкращим інструментом для розробки серверної частини Web-додатку є фреймворк *Express.js*, що працює на базі *Node.js*. В рамках розробки застосовано мікросервісну архітектуру, яка дозволяє масштабувати окремі компоненти системи, не впливаючи на її загальну роботу. Крім того, реалізовано підхід *API-first*, що забезпечує легку інтеграцію із зовнішніми сервісами та мобільними застосунками. З метою підвищення функціональності, було використано графові бази даних для управління даними про фінансові транзакції та взаємозв'язки між категоріями витрат. Застосовано алгоритми машинного навчання для аналізу даних і надання користувачам рекомендацій щодо економії. Оптимізовано інтеграцію з фреймворком *Next.js*, що дозволило забезпечити швидке завантаження сторінок завдяки серверному рендерингу. Встановлено, що важливою перевагою *Express.js* є можливість попередньо генерувати статичні сторінки, що зменшує навантаження на сервер. Виявлено, що для локального зберігання даних про фінанси найкраще використовувати *IndexedDB*, що надає можливість зберігати великі об'єми даних прямо в браузері користувача. Це дозволяє застосунку працювати без постійного підключення до мережі, зберігаючи дані в асинхронному режимі. Застосовано компонентний підхід у процесі розробки інтерфейсу, що спрощує подальшу підтримку та розвиток системи. Додатково впроваджено функцію нічного режиму та автоматичне генерування звітів для поліпшення взаємодії з користувачем.

Ключові слова: програмування, бази даних *IndexedDB*, *Express.js*, *Back-end*, *API*, *NoSQL*, домогосподарство.

Постановка проблеми. У сучасному світі, де технології швидко розвиваються та бізнес-процеси стають все більш складними, ефективне управління фінансовими ресурсами стає визначальним фактором для досягнення успіху в глобальному економічному середовищі. Спостерігаючи за цим трендом, виникає важлива потреба в створенні інноваційних інструментів для оптимізації управління витратами коштів. Актуальність питання застосування інноваційних підходів до розробки серверної частини WEB-застосунку контролю бюджету домогосподарства, впливає із зростаючої конкуренції та швидкому темпі змін у економічному середовищі, що змушують підприємства шукати нові, ефективні методи управління фінансами.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Питаннями управління, аналізу та контролю

бюджетом домогосподарства займаються багато українських та закордонних науковців. Так, наприклад, Ясишена В., Долюк А., Ярова Ю. вважають, що ключовим аспектом управління бюджетом домогосподарства є відповідальність за свої фінанси і прийняття рішень, які відображають потреби та цілі [1, с. 282]. У свою чергу Крилова І. досліджувала питання регулювання водопостачання та водовідведення у різних країнах світу, зокрема у Бельгії кожен оператор послуг має запровадити шестирічний прогноз на основі «Тарифного плану» з конкретними цінами на споживання домогосподарств та тарифи, які їх не стосуються [2, с. 68]. Європейські науковці Ванус Й. (Vanus J.), Кучера П. (Kucera P.), Мартінек Р. (Martinek R.) та Козьорек Й. (Koziorek J.) розробляли прикладне програмне забезпечення

візуалізації, яке використовується для керування операційними та технічними функціями в системі «Розумний дім». Пропонуються ефективні методи перевірки надійності створеного програмного забезпечення [3]. Австрійські дослідники Марушич Л. (Marusic L.), Скоцир П. (Skocić P.), Петрич А. (Petric A.), Єжич Г. (Jezic G.) вважали, що одним із способів зменшення споживання енергії домогосподарством є підвищення обізнаності споживачів, люди часто недбалі, коли йдеться про зниження споживання енергії, навіть якщо це може добре вплинути на їхній сімейний бюджет. Тому авторами презентовано мобільний сервіс Home-in-Palm для дистанційного контролю споживання електроенергії домогосподарствами, який дозволяє дистанційно керувати побутовою технікою, автоматично змінювати стан приладу залежно від місця розташування користувача або певного моменту часу, а також автоматично зменшувати споживання енергії домогосподарством [4].

Постановка завдання. Розробити серверну частину WEB-застосунку контролю бюджету домогосподарства з використанням фреймворку Express.js застосувавши інноваційні підходи, для автоматичного отримання фінансових даних з метою їхнього подальшого аналізу та ефективного прийняття управлінських рішень.

Виклад основного матеріалу. У контексті проектування та розробки серверної частини Web-застосунку контролю бюджету домогосподарства, обов'язковим етапом є аналіз предметної області. Цей аналіз дозволяє визначити основні вимоги, тенденції та виклики, з якими стикаються люди під час управління фінансами. Нижче розглянуті популярні застосунки або ж Web-платформи для ведення обліку витрат коштів.

Mint Expense Tracker [5] є Web-сервісом та мобільним додатком, які дозволяють користувачам автоматично відстежувати свої витрати, аналізувати бюджет та отримувати підказки щодо економії. Додаток є частиною фінансового платформи Mint, яка належить компанії Intuit. Основна суть даного додатку полягає в тому, щоб надати користувачам можливість зберігати в одному місці всю інформацію про їхні фінанси, витрати та доходи, і надавати аналіз цих даних для кращого розуміння їхнього фінансового стану.

Функції Mint Expense Tracker включають:

- автоматичне відстеження витрат: система автоматично підключається до банківських рахунків та кредитних карт користувача, а потім авто-

матично структурує транзакції за різними видами витрат (їжа, транспорт, розваги тощо);

- створення бюджету: користувачі можуть встановлювати місячні бюджети для різних категорій та слідкувати за їхнім виконанням. Mint надсилає сповіщення, якщо витрати виходять за встановлені рамки;

- аналітика та звіти: сервіс надає графіки та звіти щодо фінансового стану, розподілу витрат, змін в бюджеті та інші аналітичні дані для кращого розуміння фінансової ситуації.

You Need A Budget [6] – це програма для особистого фінансового управління, спрямована на допомогу користувачам ефективно вести бюджет та досягати фінансових цілей. Додаток розвивається компанією YNAB, і його філософія базується на ідеї «Every Dollar Has a Job» («Кожен долар має своє призначення»). Даний застосунок підходить до розробки фінансових навичок та допомагає користувачам бути впевненими у своєму фінансовому майбутньому, забезпечуючи прозорість та контроль над їхніми грошима. Також YNAB пропонує велику кількість освітніх матеріалів, щоб допомогти користувачам краще розуміти принципи бюджетування та фінансового планування.

Pocket Guard [7] – це мобільний додаток та Web-сервіс, призначений для автоматизації ведення бюджету та відстеження витрат. Основна мета – допомогти користувачам контролювати свої фінанси, створювати розумні бюджети та досягати фінансових цілей. Застосунок вирізняється своєю простотою використання та можливістю надавати користувачам широкий огляд їхніх фінансів в одному місці. За допомогою цього застосунку користувачі можуть ефективно керувати своїми фінансами та планувати витрати. Застосунок вирізняється своєю простотою використання та можливістю надавати користувачам широкий огляд їхніх фінансів в одному місці.

Враховуючи дослідження успішних Web-додатків, пропонується власна розробка серверної частини Web-застосунку контролю бюджету домогосподарства (рис. 1) з використанням вільного та відкритого програмного забезпечення Express.js [8], що працює на базі Node.js та Next.js.

У процесі розробки серверної частини даного Web-додатку були використані наступні інноваційні підходи:

- мікросервісна архітектура: розбиття застосунку на незалежні мікросервіси, що дозволяє масштабувати та оновлювати окремі компоненти без впливу на всю систему;

– API-first підхід: розробка API на початку, що дозволяє забезпечити гнучкість у інтеграції з іншими сервісами та мобільними застосунками;

– реалізація графічних баз даних: використання графових баз даних для більш ефективного управління даними про фінансові транзакції та взаємозв'язки між категоріями витрат;

– використання штучного інтелекту: інтеграція алгоритмів машинного навчання для аналізу фінансової інформації та надання рекомендацій щодо економії;

– динамічне управління категоріями: інтерфейс, який дозволяє користувачам легко налаштувати категорії витрат та отримувати рекомендації на основі їхніх фінансових звичок;

– кроссплатформенність: розробка серверної частини з урахуванням можливості інтеграції з різними Front-End технологіями, щоб забезпечити доступність на різних пристроях.

Дані підходи можуть суттєво покращити функціональність та ефективність роботи Web-застосунку.

У свою чергу потрібно відмітити, що використання Next.js може вважатися інноваційним підходом для розробки Web-застосунків, у тому числі для сервісів контролю бюджету домогосподарства, оскільки Next.js підтримує серверний рендеринг, що покращує швидкість завантаження сторінок та SEO. Це особливо важливо для застосунків, які потребують швидкого доступу до інформації. Також існує можливість попередньо генерувати статичні сторінки, що зменшує навантаження на сервер і підвищує швидкість роботи Web-додатку. Next.js автоматично оптимізує завантаження коду, завантажуючи лише те, що потрібно для конкретної

сторінки. Це покращує продуктивність застосунку. Досить важливим також є властивість Next.js легко підключатися до серверних API, що робить його зручним для роботи з мікросервісами та зовнішніми даними, а просте управління маршрутами допомагає створювати зрозумілі URL-структури, що важливо для користувацького досвіду.

У процесі розробки серверної частини Web-застосунку контролю бюджету домогосподарства було використано NoSQL бази даних IndexedDB, що є вбудованою архітектурою у браузерах, яка у свою чергу надає можливість Web-додаткам зберігати та отримувати доступ до великої кількості структурованої інформації.

Основні переваги, які надає IndexedDB:

– локальне зберігання: IndexedDB надає можливість Web-застосункам локально зберігати великі об'єми даних без необхідності відправки їх на сервер;

– асинхронний запит до бази даних: робота з даними відбувається асинхронно, що дозволяє уникнути блокування виконання інших завдань під час обробки запитів;

– структуровані дані в форматі ключ-значення: це дозволяє зберігати та вибирати дані за ключами, що полегшує організацію та отримання доступу до інформації;

– вбудована підтримка об'єктів та JSON: можливість зберігати об'єкти та дані у форматі JSON дозволяє працювати з різноманітними типами даних та забезпечує гнучкість в обробці структурованих даних.

Для доступу до бази даних створено сервіс Storage, що допоможе асинхронно отримувати та записувати дані (рис. 2).

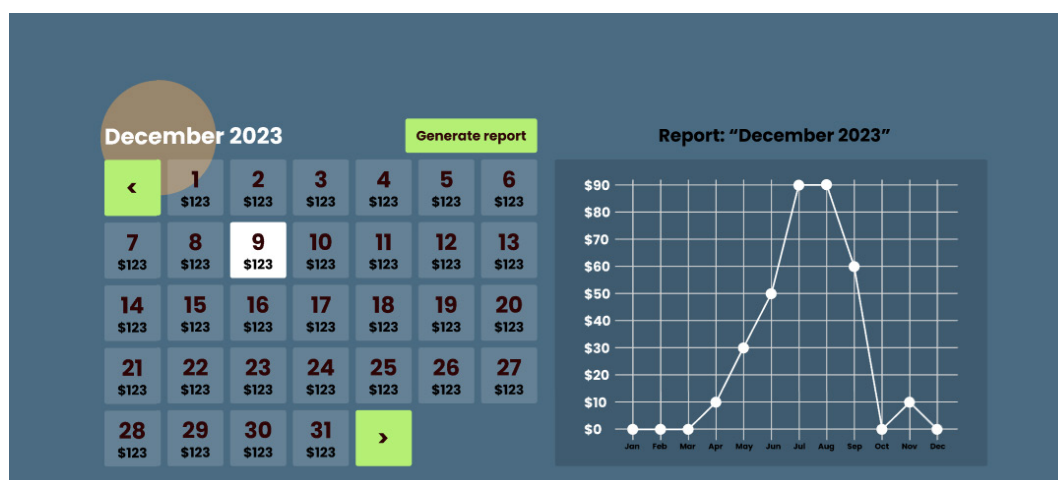


Рис. 1. Приклад побудови графіку витрат Web-застосунку контролю бюджету домогосподарства на базі Express.js

Джерело: власна розробка

```

32 export const storage = {
33   expenses: {
34     get,
35     insert: async (day: number, month: number, year: number, text: string, amount: number) => {
36       const key = `${year}-${month}-${day}`;
37
38       const expenses = await get(day, month, year);
39
40       await store.setItem<ExpenseRecord[]>(key, [...expenses, { text, amount, id: uniqid() }]);
41     },
42     remove: async (day: number, month: number, year: number, id: string) => {
43       const key = `${year}-${month}-${day}`;
44
45       const expenses = await get(day, month, year);
46
47       const index = expenses.findIndex(e => e.id === id);
48
49       if (index !== -1) {
50         await store.setItem(key, [
51           ...expenses.slice(0, index),
52           ...expenses.slice(index + 1),
53         ]);
54       }
55     },

```

Рис. 2. Створення сервісу Storage бази даних IndexedDB серверної частини Web-застосунку контролю бюджету домогосподарства

Джерело: власна розробка

Під час створення інтерфейсу користувача були використані компоненти, що дозволило перевикористати елементи інтерфейсу, спростити подальші зміни та імплементацію застосунку. Вцілому, використання компонентів не лише оптимізує процес створення інтерфейсу, але й забезпечує зручність для подальшого масштабування та розвитку застосунку, що у кінцевому результаті позитивно вплине на взаємодію з користувачами. Основні компоненти, що були використані у розробленому Web-застосунку: Background.tsx (створення фону), Block.tsx (елементи, що відображають порядковий номер дня місяця), BlockButton.tsx (блок кнопок), ExpenseDialog.tsx (відображення модальних вікон), ReportView.tsx (аналіз вихідних даних).

На рисунку 3 наведено програмний код файлу конфігурації TypeScript «tsconfig.json».

Даний файл виконує кілька важливих функцій у процесі компіляції застосунку. Він визначає специфічні параметри, які будуть використовуватись під час компіляції, що забезпечує правильну конфігурацію проекту. Це може включати налаштування для оптимізації продуктивності, вибору версій мов програмування або фреймворків, а також визначення середовища виконання.

Після додавання усіх витрат домогосподарства, користувач має можливість згенерувати звіт, у розробленому Web-застосунку. Для цього необхідно перейти на головну сторінку Web-сайту та натиснути кнопку «Generate report» (рис. 4).

Висновки. Використанням Express.js є сучасним інноваційним підходом до розробки сервер-

```

1  {
2    "compilerOptions": {
3      "target": "ESNext",
4      "useDefineForClassFields": true,
5      "lib": [
6        "DOM",
7        "DOM.Iterable",
8        "ESNext"
9      ],
10     "allowJs": false,
11     "skipLibCheck": true,
12     "esModuleInterop": false,
13     "allowSyntheticDefaultImports": true,
14     "strict": true,
15     "forceConsistentCasingInFileNames": true,
16     "module": "ESNext",
17     "moduleResolution": "Node",
18     "resolveJsonModule": true,
19     "isolatedModules": true,
20     "noEmit": true,
21     "jsx": "react-jsx"
22   },
23   "include": [
24     "src"
25   ],
26   "references": [
27     {
28       "path": "./tsconfig.node.json"
29     }
30   ]
31 }

```

Рис. 3. Конфігураційний файл TypeScript Web-застосунку контролю бюджету домогосподарства

Джерело: власна розробка

ної частини WEB-застосунку контролю бюджету домогосподарства. Сьогодні можна розглядати для застосування наступні Web-додатки для

контролю фінансів: Mint Expense Tracker, You Need A Budget та Pocket Guard, які автоматизують процес відстеження витрат, бюджетування та надання фінансових рекомендацій. Власна розробка серверної частини Web-застосунку здійснювалася на базі Express.js, із застосуванням мікросервісної архітектури та підходу API-first, що підвищує гнучкість та масштабованість інформаційної системи. Інновації у розробці Back End включають використання графових баз даних для управління транзакціями, інтеграцію машинного навчання для аналізу даних, динамічне управління категоріями витрат, а також підтримку кро-сплатформенності для зручності користувачів на різних пристроях. NoSQL бази даних IndexedDB досить інтенсивно використовуються для локального зберігання даних, що дозволяє працювати з великими об'ємами структурованої інформації без постійного звернення до сервера. Викорис-

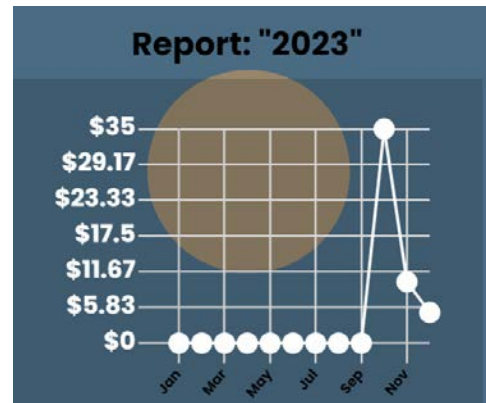


Рис. 4. Автоматично згенерований звіт по витратам за місяцями системи контролю бюджету домогосподарства з використанням Express

Джерело: власна розробка

тання компонентного підходу у розробці інтерфейсу спрощує його масштабування та забезпечує перевикористання елементів.

Список літератури:

1. Ясишена В., Долюк А., Ярова Ю. Політика управління бюджетом домогосподарств. *Вісник Хмельницького національного університету*. 2024. Том 326. №1. С. 280–288.
2. Крилова І.І. Регулювання у сфері водопостачання та водовідведення в різних країнах світу. *Вчені записки ТНУ імені В. І. Вернадського. Серія: Державне управління*. 2019. Том 30 (69). № 1. С. 66–73.
3. Vanus J., Kucera P., Martinek R., Koziorek J. Development and testing of a visualization application software, implemented with wireless control system in smart home care. *Human-centric Computing and Information Sciences*. 2014. Volume 4. URL: <https://link.springer.com/article/10.1186/s13673-014-0019-5> (дата звернення: 19.09.2024).
4. Marusic L., Skocir P., Petric A., Jezic G. Home-in-Palm – A mobile service for remote control of household energy consumption. *Proceedings of the 11th International Conference on Telecommunications: conference15-17 June 2011. Austria : Graz*. 2011. URL: <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/5969917> (дата звернення: 19.09.2024).
5. Budget Tracker & Planner : веб сайт. URL: <https://mint.intuit.com/> (дата звернення: 19.09.2024).
6. YNAB : веб сайт. URL: <https://www.ynab.com/> (дата звернення: 19.09.2024).
7. PocketGuard : Budgeting App & Finance Planner : веб сайт. URL: <https://pocketguard.com/> (дата звернення: 19.09.2024).
8. Express.js – fast, unopinionated, minimalist Web framework for Node.js : веб сайт. URL: <https://expressjs.com/> (дата звернення: 19.09.2024).

Voloshyn V.S., Opanasiuk M.Yu. INNOVATIVE APPROACHES TO THE DEVELOPMENT OF THE SERVER PART OF THE HOUSEHOLD BUDGET CONTROL WEB APPLICATION USING EXPRESS

The article explores the development of the backend for a household budget management web application, with a focus on innovative approaches and the use of modern web technologies. The subject area is analyzed to determine the main user requirements and trends in financial management. The article reviews existing solutions, such as Mint Expense Tracker, You Need A Budget, and Pocket Guard, which automate expense tracking and budgeting processes and serve as a foundation for generating original ideas. It has been established that the best tool for backend development of the web application is the Express.js framework, running on Node.js. A microservices architecture has been applied, allowing the scaling of individual system components without affecting overall performance. Additionally, an API-first approach was implemented to facilitate easy integration with external services and mobile applications. To enhance functionality, graph databases were used to manage financial transaction data and relationships between expense categories. Machine learning algorithms were employed to analyze data and provide users with savings recommendations. Integration with the Next.js framework was optimized, ensuring fast page loading through server-side rendering. It was determined that one of Express.js key advantages is the ability to pre-generate static pages, reducing server load. For local financial data storage, IndexedDB was identified as the best option, as it allows large amounts of data to be stored directly in the user's browser, enabling the application to function offline while asynchronously saving data. A component-based approach was used in interface development, simplifying future system maintenance and expansion. Additionally, a dark mode feature and automatic report generation were implemented to improve user experience.

Key words: programming, IndexedDB databases, Express.js, Back-end, API, NoSQL, housekeeping.

Геращенко О.О.

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

Новіков П.В.

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

АВТОМАТИЗАЦІЯ СИСТЕМИ ВЕНТИЛЯЦІЇ ЧИСТИХ ПРИМІЩЕНЬ З ВИКОРИСТАННЯМ МЕТОДІВ МАШИННОГО НАВЧАННЯ

Фармацевтична промисловість відіграє важливу роль у забезпеченні населення якісними та безпечними лікарськими препаратами. Стаття присвячена удосконаленню процесів керування в системах вентиляції чистих приміщень на заводах фармацевтичної продукції, які є невід'ємною частиною процесу виробництва та забезпечення контрольованих умов довкілля, необхідних для запобігання забрудненню та забезпечення безпеки продукції. Такі системи забезпечують не лише комфорт працівників в приміщеннях різного призначення, вони є надважливим фактором виготовлення якісної фармацевтичної продукції, виступаючи у ролі допоміжних системи основного технологічного процесу виробництва ліків. В статті розглянуто проблеми, з якими стикається фармацевтична галузь при впровадженні інновацій та покращенні процесів виробництва. Зокрема вимоги щодо відповідності регуляторним нормам не передбачають втручання в технологічні ланцюжки виготовлення лікарських препаратів. З іншого боку, конкуренція серед виробників спонукає підприємства знаходити резерви для підвищення ефективності споживання енергоресурсів і зменшення собівартості продукції. У статті проведено аналіз останніх актуальних досліджень щодо застосування сучасних технологій для автоматизації систем вентиляції. Визначено, що застосування цифрових технологій, таких як цифрові двійники, відкриває нові можливості для підвищення ефективності керування технологічним обладнанням. Основна увага в статті приділяється застосуванню нелінійного програмування для визначення параметрів динамічної моделі теплових процесів у вентиляційних системах. Як об'єкт керування розглянуто припливно-витяжну систему вентиляції з рециркуляцією. Визначено структуру функцій передач, які описують зв'язки між вхідними і вихідними технологічними параметрами. Проведено пасивну ідентифікацію для визначення параметрів моделей. Розроблено блок схему алгоритму пасивної ідентифікації. Визначено, що за результатами ідентифікації точність моделі складає 97.94%. Проведено налаштування каскадних систем, що дозволило підвищити точність регулювання параметрів середовища. У роботі розглянуто можливість подальшого масштабування запропонованого підходу для інших моделей технічного устаткування.

Ключові слова: припливно-витяжна система вентиляції, чисті приміщення, фармацевтична промисловість, цифровий двійник, методи ідентифікації, SCADA.

Постановка проблеми. У сучасному світі, де технологічний прогрес та інновації визначають розвиток різних галузей промисловості, системи вентиляції чистих приміщень стають важливою ланкою в забезпеченні ефективності виробничих процесів. Особливо це стосується фармацевтичної промисловості, де дотримання найвищих стандартів чистоти та контролю усіх аспектів виробництва має вирішальне значення для якості та безпеки лікарських засобів. Застосування сучасних цифрових технологій дозволяє оптимізувати функціонування систем вентиляції, що не тільки покращує ефективність та надійність виробничих процесів, але й дозволяє знаходити резерви

для зменшення собівартості виробництва. З цією метою виникає необхідність застосування цифрових технологій, для оптимізації функціонування систем вентиляції та знаходження резервів зменшення собівартості виробництва.

Незважаючи на існуючі технічні рішення у галузі вентиляції чистих приміщень, виникає ряд проблем, які обмежують їхню ефективність та адаптивність до змінних виробничих умов. Традиційні системи вентиляції відповідають високому рівню автоматизації та часто не модернізуються у зв'язку з відсутністю необхідності підвищувати точність управління. Однак, енергоефективність та швидкість реагування до змін у середовищі

виробництв можна значно покращити за допомогою цифрового двійника. Зважаючи на підвищення вартості електроенергії в Україні у зв'язку з пошкодженням енергосистеми внаслідок ракетних атак, питання енергоефективності набуває особливого значення. У таких умовах, впровадження гібридних джерел енергії та дизель-генераторів стає важливим кроком для забезпечення стабільної роботи виробництва. Використання цифрового двійника в управлінні вентиляційними системами дозволяє оптимізувати споживання енергії, збільшуючи їхню ефективність та адаптивність до змінних умов, що також важливим для підтримання конкурентоспроможності фармацевтичних компаній.

Сучасні системи автоматизації вже накопичують велику кількість даних, яку однак не так часто використовують для аналізу роботи обладнання. Наприклад, SCADA-системи великих підприємств записують показання найрізноманітніших датчиків всіх вентиляційних систем усіх приміщень підприємства. Застосування технології цифрового двійника може стати кроком уперед у вирішенні цієї проблеми. Інтеграція цифрового двійника в системи вентиляції дозволить не лише підвищити рівень автоматизації, але й забезпечити кращу якість регулювання та адаптивний контроль за параметрами середовища, забезпечуючи оптимальні умови для виробничого процесу.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Технологія цифрового двійника (ЦД) була представлена більше десяти років тому як інноваційний всеохоплюючий інструмент із очевидними перевагами, що включають моніторинг у реальному часі, моделювання, оптимізацію та точне прогнозування. Однак теоретична основа та практична реалізація цифрового двійника навіть сьогодні ще не повністю розкриті [1].

Незважаючи на те, що в дослідницьких і промислових роботах з'являється все більше успішних реалізацій, багато деталей впровадження технології недоступні для громадськості, що ускладнює повну оцінку їхніх компонентів і ефективності, порівняння, визначення успішних рішень, а також обмін досвідом. Розвиток методів машинного навчання, Інтернету речей (IoT) і великих даних (big data) призвели до значних покращень у функціях ЦД, таких як моніторинг у реальному часі та точне прогнозування [2]. Незважаючи на цей прогрес і зусилля окремих компаній, у цій галузі існують певні прогалини в дослідженнях і впровадженні, які досі перешкоджають широкому впровадженню концепції та технології DT.

ЦД був вперше представлений Майклом Гривсом трьома компонентами: цифровий (віртуальна частина) та реальний фізичний продукт плюс зв'язок між ними. Однак інші автори, такі як Тао та ін. [3] розширили цю концепцію до п'яти компонентів, включивши дані та сервіс як частину ЦД. Тао та ін. [4] також ввели поняття VV&A (verification, validation and accreditation, перевірку, валідацію та акредитацію) як компоненти ЦД і стверджує, що «ЦД характеризуються бездоганною інтеграцією між кібернетичним і фізичним просторами».

Оскільки наведені вище визначення є концептуально обґрунтованими, досягнення консенсусу щодо визначення ЦД вимагає визначення основних вимог до ЦД. З розвитком технологій, від яких залежить ЦД (таких як машинне навчання, великі дані та кібербезпека), ці вимоги з часом змінилися. Таким чином, загального опису архітектури ЦД також не існує, адже це сильно залежить від галузі, у якій використовується технологія [5].

Найпопулярнішим сектором для впровадження ЦД є управління життєвим циклом продукту (Product Lifecycle Management, PLM). Тао та ін. [3] обговорюють, що дані в PLM є ізольованими, фрагментованими та застійними. Робота також представляє теоретичну основу застосування ЦД до PLM, пропонуючи три етапи проектування: концептуальне проектування, детальне проектування та віртуальна перевірка. Ці етапи зображені на рис. 1.

У дослідженні також наведено приклад ЦД для велосипедів як тематичне дослідження, але не згадується методологія впровадження: наприклад, для проведення тестів на велосипеді з параметрами, що включають гальма, швидкість руху і вагу користувача, необхідне проведення фізичної симуляції, а також не вказане програмне забезпечення для проведення експерименту.

Куан Лю та ін. [5] пропонують використовувати рушій з відкритим кодом Unity3d для реалізації ЦД. Науковці створили еталонну модель для обробки та синхронізації складних систем автоматизованої потокової виробничої системи (Automated Flow-Shop Manufacturing System, AFMS) за допомогою ЦД, яка зокрема вирішує проблему оптимізації виробництва. Якщо ЦД – це весь життєвий цикл продукту, то використання аналітики та машинного навчання в ЦД означатиме визначення спільної проблеми оптимізації для життєвого циклу. Обробка безлічі параметрів і розв'язання задач багатоцільової оптимізації є актуальною проблемою для складних систем. Однак Куан Лю та ін. [5] успішно застосували

прототип DT для обробки даних у Ченду та Китаї й використали евристичні вимірювання, такі як виробничі пакети, уніфікована вартість системи та уніфікована продуктивність системи, щоб оцінити продуктивність ЦД (що призводить до доменно-залежного ЦД). На рис. 2 показано ЦД-кероване проектування AFMS.

Приклади компаній, які інвестують у технологію ЦД або надають програмне забезпечення ЦД

для клієнтів, або використовують функціональність ЦД для себе:

1. Інвестування в ЦД:

– Philips досліджує концепцію цифрового двійника для освітлення, оцифровуючи його [6]. Вони стверджують, що ЦД забезпечує функціонування екстрених служб, моніторинг у реальному часі та прогнозування технічного обслуговування.

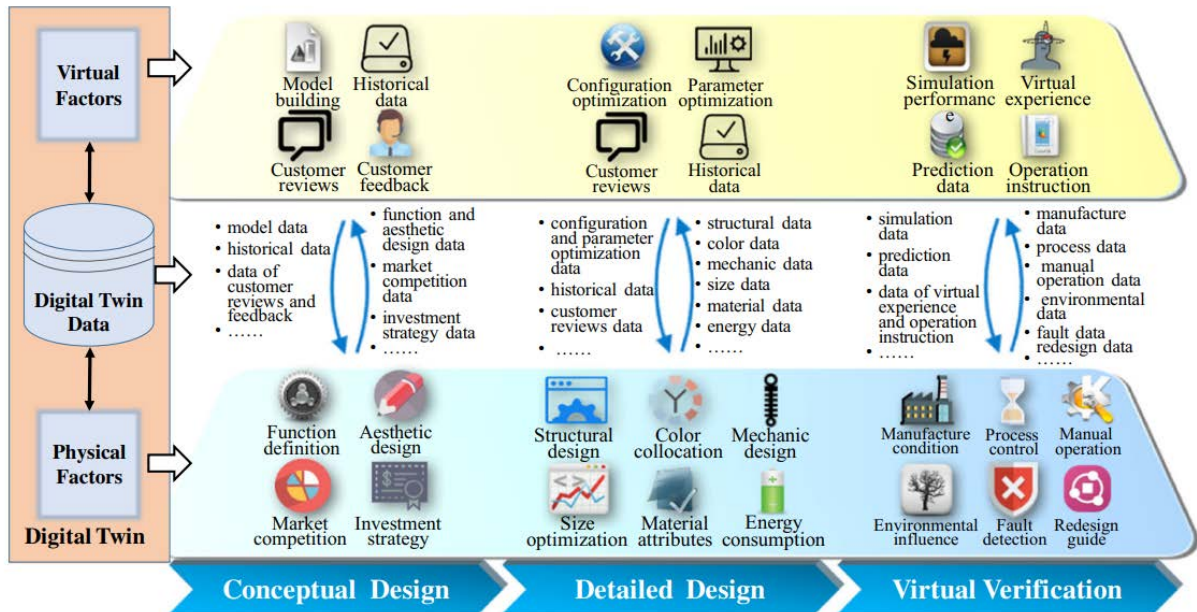


Рис. 1. Теоретична основа застосування ЦД для PLM

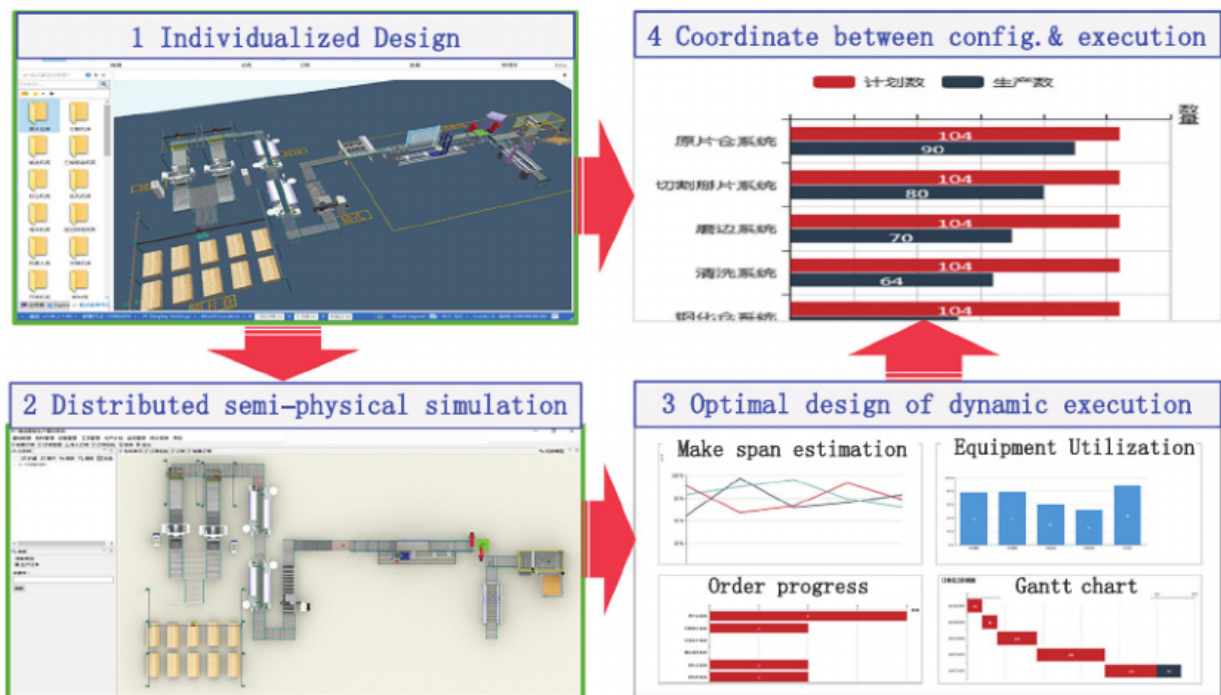


Рис. 2. ЦД-кероване проектування AFMS

2. Надання ЦД як послуги:

– Philips також надає технологію ЦД для використання систем охорони здоров'я, щоб отримати ранні ознаки попередження щодо технічних проблем у магнітно-резонансній томографії (Magnetic resonance imaging, MRI), комп'ютерній томографії (КТ) медичних апаратів [7]. Це може заощадити час простою обладнання.

– IBM трансформує порт Роттердам, використовуючи ЦД для моніторингу та підвищення загальної ефективності [8].

– Siemens має модель для впровадження цифрового двійника електромережі у Фінляндії [9].

3. Використання ДТ для власного використання:

– DHL впровадив свій перший цифровий двійник ланцюжка поставок для складу Tetra Pak в Азіатсько-Тихоокеанському регіоні в Сінгапурі [10]. Хоча це й моніторинг у реальному часі, використання машинного навчання або не присутнє, або не є загальнодоступним, можливо, через його конкурентну перевагу.

Залежно від технологій IoT, великих даних та машинного навчання, може існувати величезний розрив між ідеальним впровадженням ЦД і практичним (наприклад, чи є необхідний прогрес у технології на даний момент доступний або підлягає подальшому дослідженню). Вартість і кількість доступних ресурсів також можуть сприяти збільшенню цього розриву в реалізації. Це обговорення залежить від детальнішого дослідження та наявності фактичного програмного забезпечення ЦД та його початкового дизайну. Деякі рішення, що наведені вище, використовують стороннє програмне забезпечення ЦД, але не описують детально кроки його побудови. У деяких статтях стверджується успішне використання ЦД для обробки даних, моніторинг у реальному часі, тестування моделювання та оптимізація [11]. Однак без доказів, заснованих на оцінці та показниках, важко зрозуміти, наскільки успішними є поточні впровадження ЦД.

Розглянемо також приклади моделювання, що тісно пов'язані з процесом управління температурою повітря системи вентиляції. Наприклад, моделювання процесів теплообміну у калорифері дослідниками у статті [12]. Автори використовують аналітичну модель із зосередженими параметрами. Розрахункова схема водяного калорифера представлена на рис. 3.

$$\Delta\theta_A = \frac{1}{a_3p^3 + a_2p^2 + a_1p + 1} [(b_2p^2 + b_1p + b_0)\Delta\theta_{A0} + (b_5p^2 + b_4p + b_3)\Delta G_A + b_6\Delta\theta_{W0} + b_7\Delta G_W]$$

Модель охолоджувача матиме аналогічний вигляд через однакову фізику процесів, що протікають в цьому технічному устаткуванні.

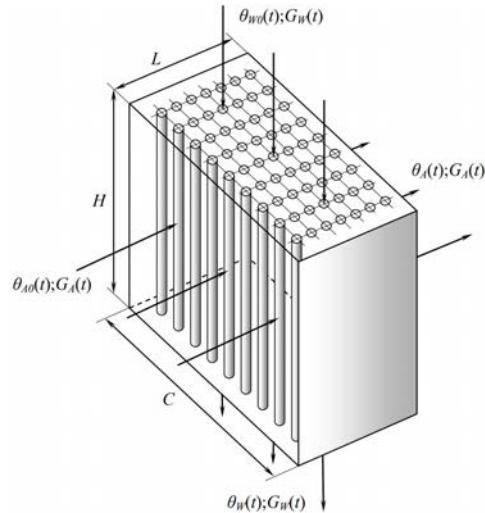


Рис. 3. Розрахункова схема калорифера

Модель приміщення розглядається в науковій роботі [13]. Дослідники подають модель приміщення у наступному вигляді:

$$\Delta\theta_A = \frac{1}{a_2p^2 + a_1p + 1} [(b_1p + b_0)\Delta\theta_{A0} + (b_3p + b_2)\Delta G_A + (b_5p + b_4)\Delta N_E + b_6\Delta\theta_N],$$

На основі цих рівнянь, виведена структурну схему впливів динамічних процесів, вона зображена на рис. 4. Видно, що на вихідну температуру θ_A впливають такі параметри:

- θ_{A0} – температура повітря на виході;
- G_{A0} – витрата повітря;
- θ_{W0} – температура води на вході;
- G_{W0} – витрата води на вході.

Результуючими два параметри, а саме θ_A (вихідна температура повітря) та G_A (вихідна витрата повітря через калорифер).

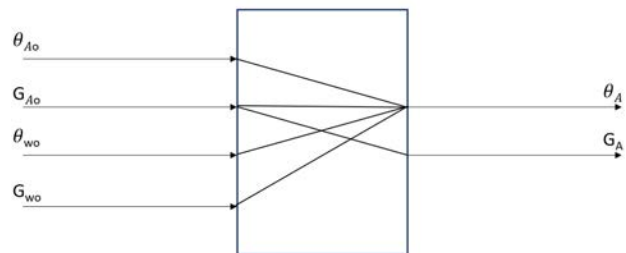


Рис. 4. Структура впливів динамічних елементів

Різницю моделі від реальності продемонстровано на рис. 5 та 6 (для нагрівача та охолоджувача відповідно):

Як видно з наведених графіків, результати майже однакові. Перевагою цієї моделі можна назвати те, що вона враховує відразу велику кількість технічних процесів, що може свідчити про

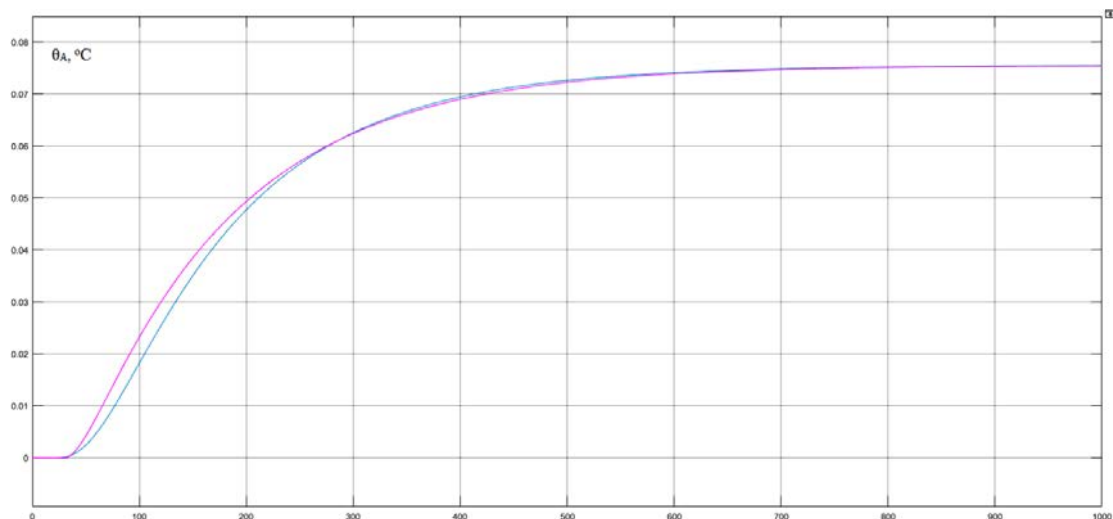


Рис. 5. Перехідні процеси калориферу

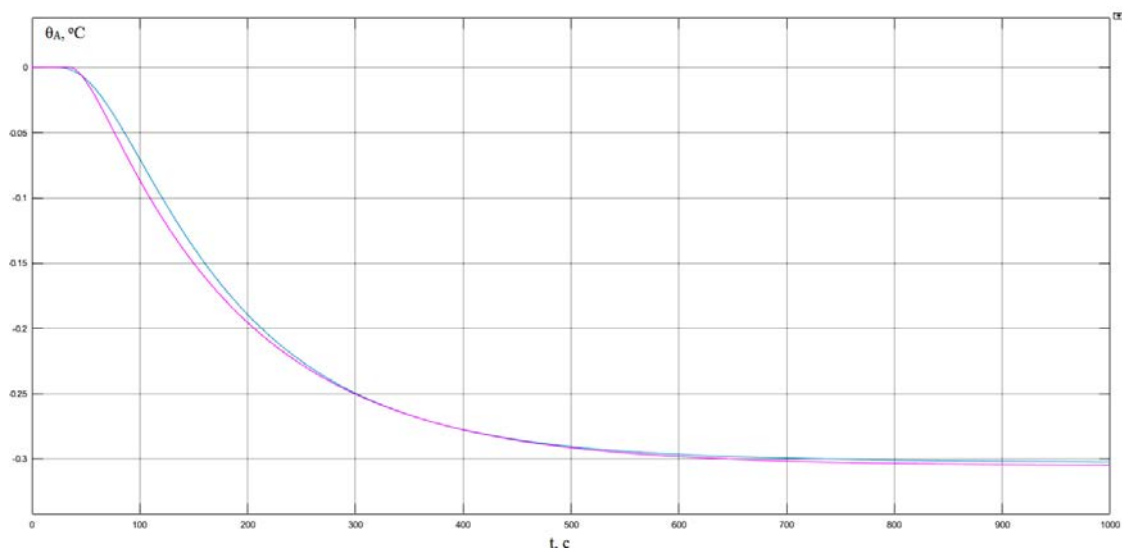


Рис. 6. Перехідні процеси охолоджувача

її точність. Недоліком аналітичного підходу є те, що отримання моделі потребує значних часових ресурсів, спеціалістів високої кваліфікації, глибокого розуміння фізики процесів, а також конструктивних особливостей технологічного обладнання.

Інший запропонований підхід отримання моделі [14] полягає в тому, що розрахунок здійснюється за допомогою нелінійного програмування на основі експериментальних даних. Результати роботи, з яких можна зробити висновок, що модель адекватна, наведені на рис. 7. T_{ha}^{model} - температура калориферу з моделі, $T_{ha}^{measured}$ – реальна температура калориферу.

Перевагою методу є те, що всі дані отримані з працюючої системи на виробництві. Модель в цьому випадку враховує усі деталі і особливості конкретного екземпляра обладнання.

Постановка завдання. Метою дослідження є розробка системи автоматизації вентиляції чистих приміщень з використанням інструментарію цифрового двійника на основі застосування методів машинного навчання для ідентифікації параметрів моделі об'єкту керування.

Виклад основного матеріалу дослідження. Математичне моделювання припливно-витяжної системи вентиляції.

Головними засобами для регулювання температури повітря, є теплообмінні апарати. Тому це є основні елементи, динамічні характеристики яких необхідно дослідити.

Для аналізу впливів керування та збурення на припливно-витяжну систему вентиляції (ПВСВ) розглянемо технологічну схему на рис. 8.

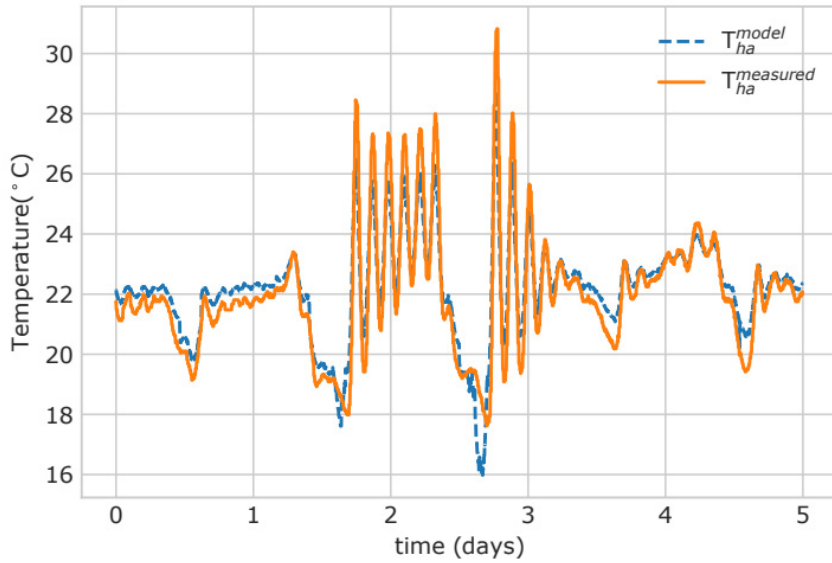


Рис. 7. Результати предиктивного контролю за нелінійною моделлю

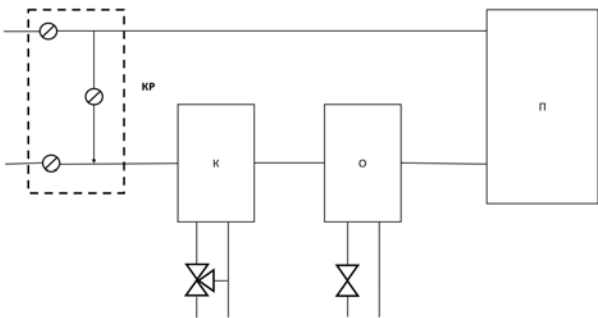


Рис. 8. Технологічна схема вентиляційної системи з рециркуляцією

На схемі зображені основні структурні елементи ПВСВ з рециркуляцією: К – калорифер; О – охолоджувач; П – приміщення; КР – камера рециркуляції; Трубопроводи.

Для регулювання температури у приміщенні існує два контури регулювання. Перший контур

це робота на нагрів повітря, він використовується взимку і реалізується за допомогою калорифера нагріву. Другий контур – це контур охолодження. Він реалізований охолоджувачем та використовується влітку.

Провівши декомпозицію цієї технологічної схеми на окремі елементи, можна отримати розширену параметричну схему вентиляційної системи [14], де представлено зв'язки між входами та виходами кожного апарату, рис. 9.

На схемі детально представлено все технічне устаткування, а також по ній можна відслідкувати вплив того чи іншого устаткування на кінцеві процеси. На схемі також наведено залежності кожного технічного устаткування та проміжних ланок, таких як повітропровід.

Проведемо аналіз технології. Керуючий вплив калориферу нагріву – температура води. Це пов'язано з тим, що між входом і виходом кало-

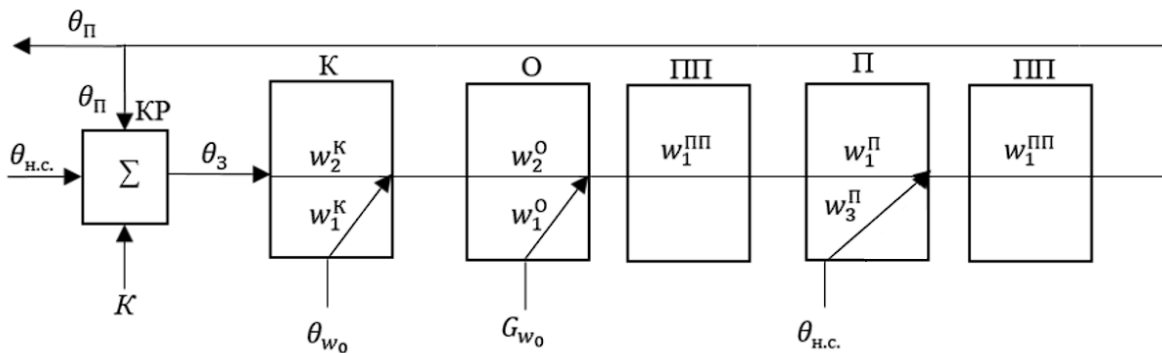


Рис. 9. Розгорнута параметрична схема ПВСВ із рециркуляцією

рифера стоїть 3-х ходовий клапан і витрата циркуляції теплоносія в калорифері завжди однакова. Зміна співвідношення відкриття та закриття клапану змінює температуру теплоносія, що йде в калорифер. Цей вплив позначається на схемі перехідною функцією W_1^k , але також зі схеми видно, що калорифер також містить іншу складову, а саме передаточну функцію W_2^k .

Таким чином, якщо прийняти до уваги ще й технічні особливості цієї системи, побачимо, що необхідно враховувати повітропровід та охолоджувач, адже навіть якщо охолоджувач не працює разом з калорифером нагріву, він забирає на себе невелику частину теплової енергії.

В охолоджувачі керуючий вплив – витрата. В ньому регулювання виконується звичайним 1-ходовим клапаном, тож при регулюванні змінюється саме витрата холодної води. Але аналогічним чином можна побачити, що на охолоджувач впливає не лише витрата води, а ще й технічне приміщення, трубопровід та навантаження.

Розгорнуту параметричну схему, що зображено на рис. 9 можна агрегувати й звести до структурної схеми, що зображена на рис. 10.

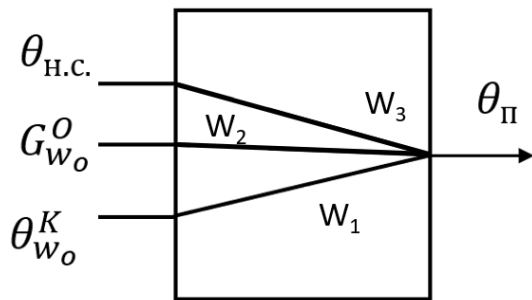


Рис. 10. Структурна схема температури в приміщенні

Ця схема показує, що температура приміщення залежить відразу від трьох вхідних величин, що мають свої перехідні функції, а саме:

- $\theta_{н.с.}$ – температура навколишнього середовища;
- $G_{w_0}^o$ – витрата на охолоджувачі;
- $\theta_{w_0}^k$ – температура калорифера.

Таким чином можна скласти формули впливу на приміщення температури води, що входить у калорифер. Залежність між входами і виходами структурних схем на рис. 9 та 10 визначається за такими залежностями:

$$W_1 = \frac{\theta_{п.}}{\theta_{w_0}^k} = w_1^k w_2^o w_1^{\text{II}} w_1^{\text{III}}$$

$$W_2 = \frac{\theta_{п.}}{G_{w_0}^o} = w_1^o w_1^{\text{II}} w_1^{\text{III}}$$

$$W_3 = \frac{\theta_{п.}}{\theta_{н.с.}} = w_1^k w_2^o w_1^{\text{II}} w_1^{\text{III}}$$

$$W_3 = \frac{\theta_{п.}}{\theta_{н.с.}} = \frac{(1-K) w_2^k w_2^o w_1^{\text{II}} w_1^{\text{III}}}{1 - K w_2^k w_2^o w_1^{\text{II}}} + w_3^{\text{II}} w_1^{\text{III}}$$

Оскільки в роботі [13], автори приходять до спрощення перехідних функцій до аперіодичних ланок першого та другого порядків, а в статті [14] ці об'єкти представлені аперіодичними ланками першого порядку, прийнято гіпотезу щодо наступного вигляду передатних об'єктів моделі функцій:

$$W_1 = \frac{k_k}{T_k p + 1} \cdot e^{-p \tau_k} \quad (1)$$

$$W_2 = \frac{k_o}{T_o p + 1} \cdot e^{-p \tau_o} \quad (2)$$

$$W_3 = \frac{k_{н.с.}}{T_{н.с.} p + 1} \cdot e^{-p \tau_{н.с.}} \quad (3)$$

Обґрунтування методу для ідентифікації параметрів моделі. Для подальшої роботи над математичною моделлю обрано експериментальний метод, бо для даної моделі дуже важливо оцінити модель точно, а використання технології цифрового двійника дає можливість цю модель уточнювати, отже й проблем адаптації моделі до зовнішніх умов в моделі немає. З огляду на те, що обладнання працює без відриву від виробництва, проведення активного експерименту з поданням збурюючих впливів на обладнання неможливе, тому був використаний метод пасивного експерименту, який полягав в отриманні великого масиву даних протягом трьох місяців.

Методи параметричної ідентифікації широко застосовуються при рішенні практичних завдань ідентифікації лінійних і нелінійних систем. Питанню оцінювання результатів присвячено багато робіт, починаючи з розробки К. Гауссом методу найменших квадратів в 1795 р., на даний момент існує безліч різних підходів, способів і методів параметричної ідентифікації.

Процедура параметричної ідентифікації або оцінювання параметрів – це процес визначення значень, що характеризують динаміку об'єкту, за допомогою певних способів обробки експериментальних даних у попередньому припущенні, що структура моделі досліджуваного об'єкта відома, тобто при наявності математичної моделі об'єкту. В якості параметрів моделі розглядаються коефіцієнти диференціальних рівнянь, передаточних функцій, частотних характеристик або нелінійних рівнянь тощо.

Одним з методів оцінювання параметрів, є метод найменших квадратів. Задача полягає в наступному: за наявними виборчими даними спостереже-

них за вхідними та вихідними сигналами з інтервалом дискретизації Δt потрібно оцінити значення параметрів, що забезпечують мінімальну величину параметрів функціональної похибки (неув'язки) між модельними та фактичними даними.

Як критерій близькості використовується мінімальна квадратична нев'язка J значень фактичних змінних y_j і модельних.

$$J(a_i) = \sum_{j=1}^N e_j^2 = \sum_{j=1}^N (y_j - y_{Mj})^2 = \sum_{j=1}^N (y_j - (a_0 + a_1 x_j + a_2 x_j^2 + \dots + a_m x_j^m))^2 \rightarrow \min,$$

де y_j – експериментальне значення вихідної змінної, отримане в j -ий момент часу; y_{Mj} – модельне (розрахункове) значення в той же момент часу.

Для знаходження коефіцієнтів регресії складаються рівняння наявності екстремуму за кожним параметром a_i :

$$\frac{\partial J}{\partial a_i} = 0, \quad i = 0, 1, \dots, m.$$

Сукупність таких співвідношень утворює систему рівнянь щодо оцінок $m+1$ коефіцієнтів рівняння регресії, вирішення якої визначає шукані коефіцієнти.

Пошук коефіцієнтів моделі можна шукати чисельним методом, що ґрунтується на використанні градієнтних методів. Налаштування моделі може розглядатися як рух по гіперболі $J = J(\beta)$ у просторі параметрів β до точки екстремуму. Відповідно до цього, завдання визначення параметрів моделі інтерпретується як задача оптимізації цільової функції $J(\beta)$. Для вирішення такого завдання можуть використовуватися градієнтні методи, що ґрунтуються на ітераційній процедурі наближення до екстремуму цільової функції, що характеризується співвідношенням:

$$\beta(k+1) = \beta(k) + \gamma(k) \text{grad} J[\beta(k)],$$

де $\beta(k)$ – поточне наближення до істинного вектора параметрів β^* ; $\gamma(k)$ – службовий параметр, що характеризує довжину k -го кроку ітераційного процесу; k – номер ітерації. Градієнтні методи є основою для ідентифікації складних об'єктів та для оптимізації нелінійних критеріїв якості ідентифікації.

На основі цих відомостей, для ідентифікації було вибрано метод найменших квадратів, оскільки він є більш універсальним та простим у імплементації.

Пасивна ідентифікація аналітичної моделі вентиляційної системи.

Пасивна ідентифікація математичної моделі виконувалася за алгоритмом, блок-схема якого зображена на рис. 11.

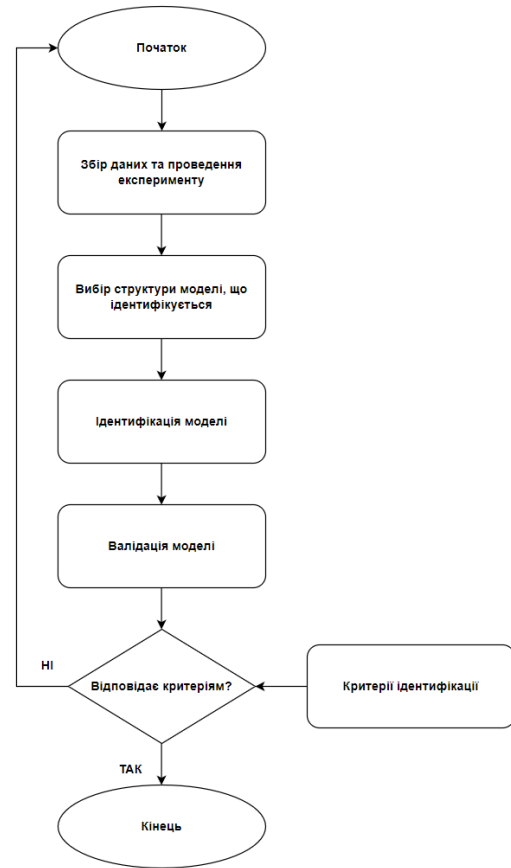


Рис. 11. Блок-схема процесу ідентифікації параметрів системи

Ідентифікація системи базується на реальних даних. Тому, весь процес починається з проведення експерименту та процесу збору даних з системи. Результат збору даних зображено на рис. 12–14 у вигляді трендів.

Процес ідентифікації та налагодження моделі – це ітеративний процес, який передбачає уточнення параметрів моделі для підвищення її точності. Наступним кроком є валідація моделі, що полягає у порівнянні показників математичної моделі та реальної роботи системи.

Якщо модель не відповідає критерію (або критеріям), процес починається спочатку. Можливо, необхідно зібрати більше вхідної інформації, чи змінити структуру моделі, чи налагодити сам алгоритм ідентифікації, після чого спробувати знову. Цей процес продовжується до тих пір, поки поставлені критерії не досягнуті і модель не вважається придатною до використання.

Розробка експериментальної математичної моделі системи вентиляції.

Для ідентифікації параметрів моделі було використано програмне забезпечення Matlab Identification Toolbox. Пасивну ідентифікацію

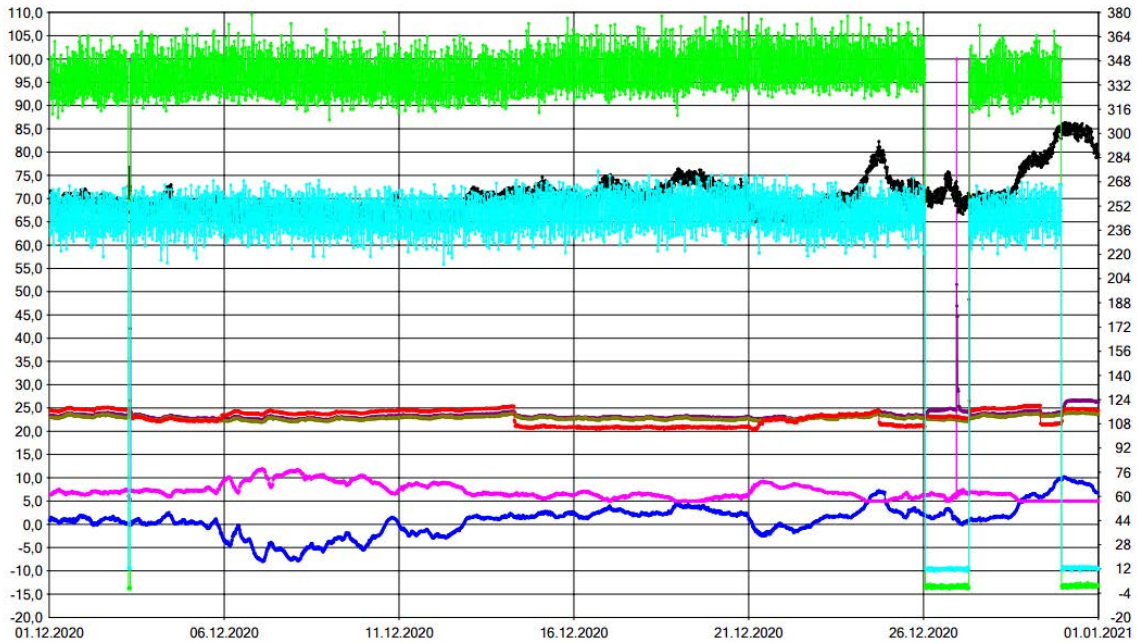


Рис. 12. Тренди основних характеристик побудови моделі за період з 01.12.2022 по 01.01.2023

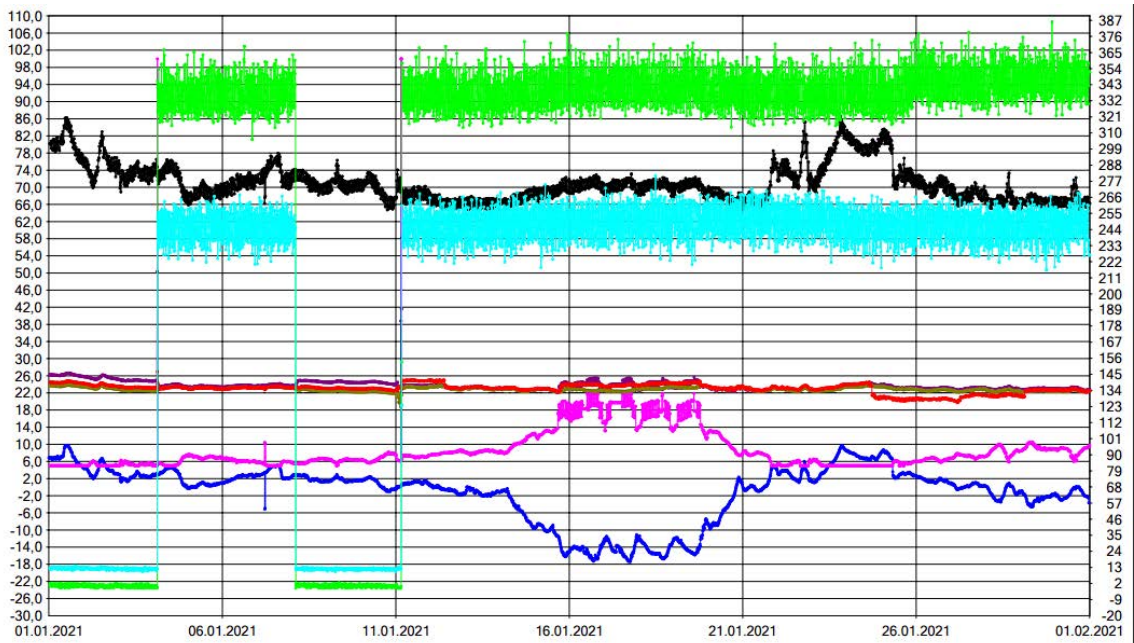


Рис. 13. Тренди основних характеристик побудови моделі за період з 01.01.2023 по 01.02.2023

проведено за алгоритмом, наведеним на рис. 11. З зібраних параметрів створено файл heaterdata. Код програми показано на рис. 15.

Графік процесу представлено на рис. 16.

Таким чином, задано дані для ідентифікації. Аналогічним чином задаємо дані для валідації адекватності моделі. Відповідні графіки наведені на рис. 17.

Далі необхідно оцінити затримку системи, що робиться програмно та використати вбудовану у Matlab функцію для отримання передаточної функції. Таким чином, отримуємо параметри моделі. Після ідентифікації модель набуває вигляду:

$$W_{\kappa} = \frac{0.39}{87p + 1} e^{-15p}$$

Наступним після ідентифікації кроком за блок-схемою процесу (рис. 11) є перевірка параметрів моделі на адекватність. Для цього порівнюємо

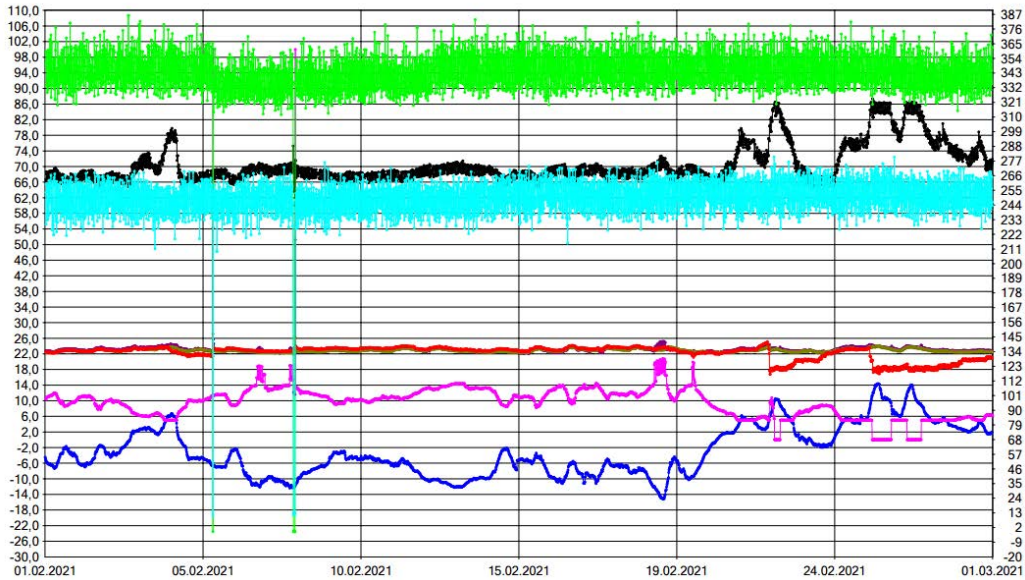


Рис. 14. Тренди основних характеристик побудови моделі за період з 01.02.2023 по 01.03.2023

```

/MATLAB Drive/heaterModel.m
1   load heater_data
2
3   Ts = 0.5; % Час дискретизації
4
5   % Збір даних з використанням команди |iddata| для їх відображення командою
6   % plot
7   heater_data = iddata(output1.data,input1.data,Ts);
8   heater_data.InputName = 'Збурення';
9   heater_data.InputUnit = 'C';
10  heater_data.OutputName = 'Реакція';
11  heater_data.OutputUnit = 'C';
12  heater_data.TimeUnit = 'minutes';
13  plot(heater_data)
14  set(findall(gca, 'Type', 'Line'),'LineWidth',4);
15  grid on
16
    
```

Рис. 15. Процес перенесення параметрів системи у середовище Matlab

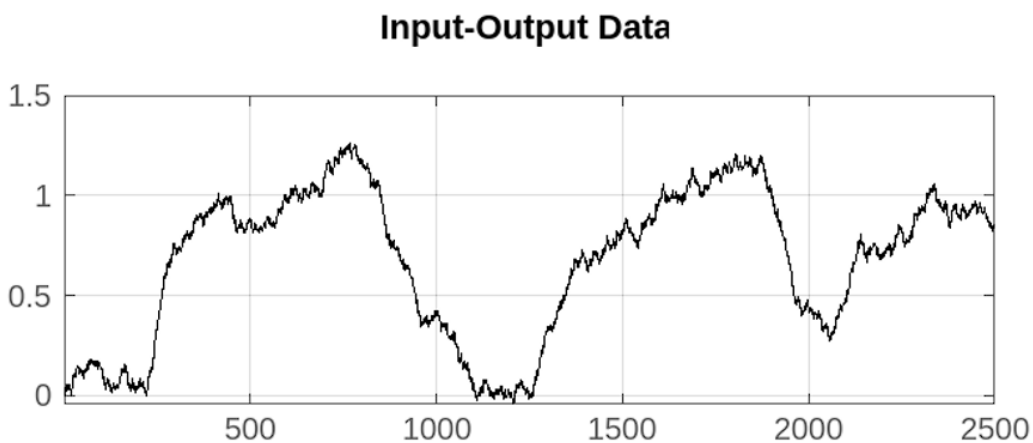


Рис. 16. Графік процесу нагріву повітря калорифером

Input-Output Data

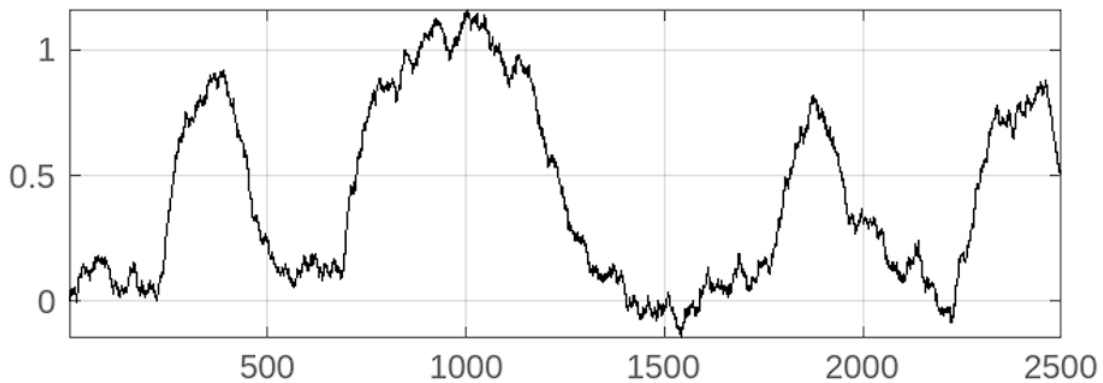


Рис. 17. Графік процесу нагріву повітря калорифером для валідації

```

34 % Перевірка моделі
35 opt = compareOptions;
36 opt.InitialCondition = 'z';
37 compare(heater_data,sysTF, opt);
38 set(findall(gca, 'Type', 'Line'),'LineWidth',4);
39 grid on
40 % Перевірка даних для валідації
41 opt = compareOptions;
42 opt.InitialCondition = 'z';
43 compare(validation_data,sysTF,opt)
44 set(findall(gca, 'Type', 'Line'),'LineWidth',4);
45 grid on
    
```

Рис. 18. Перевірка моделі

реальні дані з реакцією моделі на таке саме збурення. Код програми наведено на рис. 18.

На рис. 19 представлені результати порівняння моделі та реальної роботи системи.

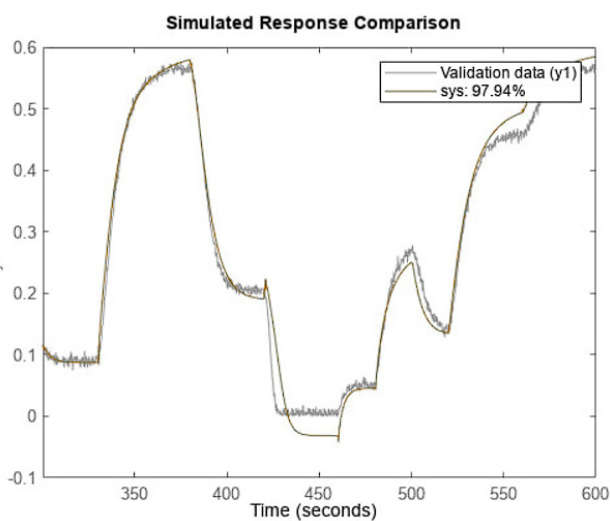


Рис. 19. Результати валідації моделі системи

Як видно з результатів, точність моделі складає 97.94%. Наступним кроком є оцінка відповідності

моделі до критеріїв. Покращення цієї математичної моделі – це окремий процес роботи з такими параметрами, як структура моделі, налагодження самого алгоритму ідентифікації або навіть збір більшої кількості даних.

Аналогічним чином можна програму для ідентифікації параметрів охолоджувача, знайдемо перехідні функції охолоджувача та приміщення.

Розробка системи керування вентиляційної системи.

Для управління була обрана каскадна система автоматичного регулювання (КСАР). Каскадна схема регулювання режиму роботи системи на нагрів виглядає наступним чином:

Виходячи зі структури системи вентиляції, що розглядається, можна дійти до висновку, що коригуючий регулятор налаштовується на температуру в приміщенні, а стабілізуючий – на температуру після технічного устаткування, тобто калорифера чи охолоджувача відповідно.

Варто зазначити, що формула еквівалентного об'єкту у випадку, коли система працює на нагрів, виглядає так:



Рис. 20. Структура каскадної системи регулювання WRFPV2V

$$W_{екв} = W_{вип.об.} + W_3 \cdot W_{рег.кор.} = W_1 + W_3 \cdot W_{рег.кор.}$$

Можна врахувати те, що при низьких частотах значення $W_{вип.об.}$ набагато більше за значення коригуючого регулятора, тому:

$$W_{вип.об.} \gg W_3 \cdot W_{рег.кор.} \rightarrow W_{екв} = W_{вип.об.}$$

Аналогічно й для охолоджувача.

Розрахунок стабілізуючих регуляторів.

У якості закону регулювання прийнято пропорційно-інтегральний закон, так як застосування диференційної складової не доцільне. Завданням такої системи – це досягти заданої у якості уставки температури на виході з установки. Тоді у якості зворотного зв'язку приймемо датчик температури на виході з приміщення.

Для обрахунку параметрів налаштувань регулятора проведені обрахунки методами РАФХ. Очікується отримання перехідного процесу з мінімальним показником перерегулюванням, бо у даному випадку необхідно отримати найменшу з можливих тривалостей перехідного процесу. Тому, нехай $m = \ln \frac{1-\psi}{-2\Pi} = 0,45$. Результати розрахунків прямих показників якості регулювання по каналу завдання-вихід та по каналу збурення-вихід наведені у табл. 1.

Таблиця 1

Прямі показники якості по обом каналам

Показник якості	Канал	
	завдання-вихід	збурення-вихід
Статична похибка	0	0
Динамічна похибка	0,7	0,17
Час регулювання, с	790	110
Степінь затухання	0,91	0,92
Перерегулювання, %	25,7	14,7

Аналогічно розраховано коригуючий регулятор. Показники якості наведені у табл. 2.

Таблиця 2

Прямі показники якості по обом каналам для нагрівача

Показник якості для калорифера	Канал	
	завдання-вихід	збурення-вихід
Статична похибка	0	0
Динамічна похибка	0.58	$1.72 \cdot 10^{-3}$
Час регулювання, с	2380	3460
Степінь затухання	0.93	0.88
Перерегулювання, %	20	62

Як оптимальні налаштувань ПІ-регулятора для досліджуваної системи прийняли параметри, що наведені в дослідженні вище. При переході на режим нагріву, налаштування такі: $K_p = 9,27$, $T_i = 34,71$. Для визначення параметрів налаштування охолоджувача розрахунки та підхід аналогічні.

Висновки. Наявність SCADA систем на фармацевтичних виробництвах дозволяє на основі архівних даних методами машинного навчання отримувати моделі об'єктів керування. В даній роботі на основі цих даних була створена математична модель процесу, за допомогою якої розраховані налаштування систем керування, що підвищило якість функціонування загалом. Використовуючи даний підхід, уточнення моделі також може відбуватися періодично, автоматизовано та без участі спеціалістів високої кваліфікації.

Зважаючи на схожість побудови цієї системи автоматизації з іншими, що використовуються на підприємствах, підхід, що наведений в цій статті, можна масштабувати. Розроблена математична модель може використовуватися для схожих вентиляційних систем, а параметри, надані моделлю, можна використати для всіх систем автоматизації, таким чином помноживши ефективність декількох вентиляційних установок одночасно.

Список літератури:

1. VanDerHorn E., Mahadevan S. Digital Twin: Generalization, characterization and implementation. *Decision Support Systems*. 2021. Pp 1-11. <https://doi.org/10.1016/j.dss.2021.113524>
2. Kusiak A. Smart Manufacturing Must Embrace Big Data. *Nature*. 2017. Pp 23-25. <https://doi.org/10.1038/544023a>
3. Fei Tao, Jiangfeng Cheng, Qinglin Qi etc. Digital twin-driven product design, manufacturing and service with big data. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2018. Pp 3563–3576. <https://doi.org/10.1007/s00170-017-0233-1>
4. Fei Tao, He Zhang, Ang Liu. Digital Twin in Industry: State-of-the-Art. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*. 2019. Pp. 2405-2415. <https://doi.org/10.1109/TII.2018.2873186>
5. Qiang Liu, Hao Zhang, Jiewu Leng etc. Digital twin-driven rapid individualised designing of automated flow-shop manufacturing system. *International Journal of Production Research*. 2018. Pp 12
6. Digital twins: what do they mean for lighting? URL: <https://www.lighting.philips.co.uk/oem-emea/stay-connected/digital-twins> (дата звернення 10.07.2024).
7. The rise of the digital twin: how healthcare can benefit. URL: <https://www.philips.com/a-w/about/news/archive/blogs/innovation-matters/20180830-the-rise-of-the-digital-twin-how-healthcare-can-benefit.html> (дата звернення 10.07.2024).
8. How the Port of Rotterdam is using IBM digital twin technology to transform itself from the biggest to the smartest. URL: <https://www.ibm.com/blog/iot-digital-twin-rotterdam/> (дата звернення 10.07.2024).
9. For a digital twin of the grid. URL: <https://assets.new.siemens.com/siemens/assets/api/uuid:09c20834-4ed4-49d8-923d-ebcc541cab37/inno2017-digitaltwin-e.pdf> (дата звернення 10.07.2024).
10. DHL Supply Chain partners Tetra Pak to implement its first digital twin warehouse in Asia Pacific. URL: <https://group.dhl.com/en/media-relations/press-releases/2019/dhl-supply-chain-partners-tetra-pak-implement-first-digital-twin-warehouse-asia-pacific.html> (дата звернення 10.07.2024).
11. Qingfei Min, Yangguang Lu, Zhiyong Liu etc. Machine Learning based Digital Twin Framework for Production Optimization in Petrochemical Industry. *International Journal of Information Management*. 2019. Pp. 502-519. <https://doi.org/10.1016/j.ijinfomgt.2019.05.020>
12. Голінко І. М., Галицька І. Є. Динамічна модель теплообміну для водяного калорифера у просторі станів. *Інформаційні системи, механіка та керування*. 2016. С. 83-92. http://nbuv.gov.ua/UJRN/Ismk_2016_15_13
13. Адах, В. Г., Голінко І. М. Адаптивна система керування припливно-витяжною системою вентиляції з рециркуляцією. 2019. <https://ela.kpi.ua/handle/123456789/30438>
14. Ghawash Faiq, Hovd Morten, Schofield Brad etc. Model Predictive Control of Air Handling Unit for a Single Zone Setup. *Researchgate*. 2022. <https://doi.org/10.1109/AdCONIP55568.2022.9894128>

Herashchenko O.O., Novikov P.V. AUTOMATION OF CLEAN ROOM VENTILATION SYSTEM USING MACHINE LEARNING METHODS

The pharmaceutical industry plays an important role in providing the population with high-quality and safe medicines. The article is devoted to the improvement of control processes in the ventilation systems of clean rooms at pharmaceutical factories, which are an integral part of the production process and ensuring controlled environmental conditions necessary to prevent contamination and ensure product safety. Such systems provide not only the comfort of workers in premises of various purposes, they are an important factor in the production of high-quality pharmaceutical products, acting as auxiliary systems of the main technological process of drug production. The article discusses the problems faced by the pharmaceutical industry when introducing innovations and improving production processes. In particular, the requirements for compliance with regulatory norms do not involve interference in the technological chains of the manufacture of medicinal products. On the other hand, competition among manufacturers encourages enterprises to find reserves to increase the efficiency of energy consumption and reduce the cost of production. The article analyzes the latest relevant research on the application of modern technologies for the automation of ventilation systems. It was determined that the use of digital technologies, such as digital doubles, opens up new opportunities for increasing the efficiency of technological equipment management. The main focus of the article is on the application of nonlinear programming to determine the parameters of the dynamic model of thermal processes in ventilation systems. The supply and exhaust ventilation system with recirculation is considered as a control object. The structure of transfer functions is defined, which describe the relationships between input and output technological parameters. Passive identification was carried out to determine the parameters of the models. A block diagram of the passive identification algorithm has been developed. It was determined that according to the results of identification, the accuracy of the model is 97.94%. Adjustment of cascade systems was carried out, which made it possible to increase the accuracy of the adjustment of environment parameters. The paper considers the possibility of further scaling of the proposed approach for other models of technical equipment.

Key words: supply-exhaust ventilation system, clean rooms, pharmaceutical industry, digital double, identification methods, SCADA.

УДК 004.04: 004.4'2: 004.43: 004.49
DOI <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2024.5.1/18>

Головко І.Г.

Хмельницький національний університет

Савенко О.С.

Хмельницький національний університет

Медзатий Д.М.

Хмельницький національний університет

Іванченко О.В.

Національний технічний університет «Дніпровська політехніка»

МЕТОДИ ОБФУСКАЦІЇ ПРОГРАМНОГО КОДУ ЗА ДОПОМОГОЮ ШТУЧНОГО ІНТЕЛЕКТУ

У статті розглядаються сучасні підходи до обфускації .NET коду з використанням технологій штучного інтелекту (AI). Обфускація коду є важливим інструментом для захисту програмного забезпечення від зворотного інжинірингу та несанкціонованого доступу до вихідного коду. Традиційні методи обфускації, такі як перейменування ідентифікаторів, зміна потоку управління та шифрування рядків, мають певні обмеження, оскільки вони є статичними і можуть бути легко подолані сучасними декомпіляційними інструментами. Ці методи часто потребують значних витрат часу і ресурсів на ручне налаштування та підтримку. У зв'язку з цим виникає необхідність впровадження більш інтелектуальних підходів, здатних автоматично адаптуватися до нових загроз.

У цій роботі пропонується підхід до обфускації .NET коду на основі штучного інтелекту, який включає в себе використання машинного навчання для аналізу та вибору оптимальних стратегій обфускації. Основні компоненти запропонованої інтелектуальної системи обфускації включають модуль введення, модуль попередньої обробки, AI-базований модуль обфускації, модуль перевірки якості та модуль зберігання даних. Модуль обфускації на основі AI використовує алгоритми глибокого навчання для аналізу структури коду і вибору найбільш ефективних методик обфускації, що забезпечує значне підвищення складності та захищеності коду від зворотного інжинірингу.

У статті також представлені результати експериментального дослідження, спрямованого на оцінку ефективності AI-базованого підходу до обфускації. Експеримент проводився на вибірці з 200 файлів, скомпільованих з допомогою MSBuild інструменту, розділених на контрольну та експериментальну групи. Отримані результати показали значне зростання опору реверс-інжинірингу в експериментальній групі у порівнянні з контрольної, при цьому зберігається висока функціональність та мінімальний вплив на продуктивність програмного забезпечення.

Таким чином, дослідження підтверджує ефективність використання AI у процесі обфускації .NET коду. Це відкриває нові можливості для створення більш надійних систем захисту програмного забезпечення, здатних адаптуватися до нових кіберзагроз і забезпечувати високий рівень конфіденційності та цілісності даних. У роботі зроблено висновки про перспективи подальших досліджень у напрямку вдосконалення алгоритмів навчання і розробки нових методик обфускації з використанням штучного інтелекту.

Ключові слова: обфускація коду, безпека програмного забезпечення, захист програмного коду, складність коду.

Постановка проблеми. Актуальність проблеми захисту програмного забезпечення та обфускації коду. Захист програмного забезпечення є однією з ключових проблем в сучасних умовах цифрової економіки. З кожним роком зростає кількість кібератак та методів зловмисників, спрямованих на отримання несанкціо-

ваного доступу до вихідного коду програм. Це включає в себе зворотний інжиніринг, аналіз коду для пошуку вразливостей, а також спроби несанкціонованого використання або зміни програмного забезпечення. Зважаючи на такі загрози, важливість забезпечення конфіденційності та цілісності коду стає очевидною.

Традиційні методи обфускації коду спрямовані на ускладнення його розуміння та аналізу шляхом зміни ідентифікаторів, структури коду, введення "мертвого" коду та інших технік. Однак ці методи мають певні обмеження, адже вони зазвичай є статичними і часто легко піддаються аналізу за допомогою сучасних декомпіляційних інструментів. Крім того, вони вимагають ручного налаштування, що може бути трудомістким процесом та призводити до виникнення помилок.

Зважаючи на обмеження традиційних методів, виникає потреба у впровадженні більш інтелектуальних підходів до обфускації коду, які можуть динамічно адаптуватися до змін середовища та нових загроз. Штучний інтелект, зокрема методи машинного навчання, пропонують нові можливості для автоматизації процесу обфускації. Використання AI дозволяє не лише автоматично вибирати оптимальні стратегії обфускації, але й постійно вдосконалювати ці стратегії на основі зворотного зв'язку та нових даних. Це робить процес обфускації більш гнучким, ефективним та стійким до сучасних методів зворотного інжинірингу.

Обфускація коду є особливо важливою для програм, що розробляються на платформі .NET, оскільки їх вихідний код компілюється в проміжну мову IL (Intermediate Language), яка є більш доступною для аналізу і реверс-інжинірингу. Це робить .NET програми вразливими до атак, особливо якщо вони містять критичні або конфіденційні дані. Застосування обфускації, особливо з використанням AI, дозволяє значно підвищити рівень захисту таких програм, ускладнюючи їх аналіз та використання зловмисниками.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. У сучасних умовах інформаційної безпеки обфускація коду є важливим інструментом захисту програмного забезпечення від несанкціонованого доступу та зворотного інжинірингу. Ця методика була предметом багатьох наукових досліджень, які значно розширили можливості програмного захисту.

Традиційні підходи до обфускації коду були детально вивчені та описані в численних дослідженнях. Наприклад, у роботах Крістіана Колберга (Christian Collberg) і Кларка Томпсона (Clark Thomborson) [1, с. 15] була розроблена таксономія обфускаційних трансформацій, яка стала базою для подальших досліджень у цій галузі. Вони запропонували класифікацію методів обфускації на основі ступеня їх ефективності та впливу на продуктивність програмного забезпечення.

Ці методи включають перейменування ідентифікаторів, зміну потоку управління, вставку «мертвого» коду та шифрування рядків. Однією з найбільш ефективних технік обфускації є зміна потоку управління, яка значно ускладнює аналіз та реверс-інжиніринг програм. У роботі [2, с. 2] автори досліджують можливості оптимізації компілятора для обфускації потоку управління, що дозволяє створити більш стійкі до аналізу програми на етапі компіляції. Кожен із цих методів має свої переваги та недоліки. Перейменування ідентифікаторів є простим, але не дуже ефективним способом захисту, оскільки його можна легко подолати за допомогою автоматизованих інструментів декомпіляції. Зміна потоку управління, з іншого боку, значно ускладнює розуміння логіки програми, але може призводити до значних втрат у продуктивності (для обчислення складності розуміння логіки програми було використано циклопатину складності Томаса Маккейба (Thomas McCabe)). Цикломатична складність є одним із основних показників для оцінки ефективності обфускації. Підвищення цього показника свідчить про збільшення складності аналізу коду. У роботі [3, с. 480] автори описують роль цикломатичної складності у визначенні рівня складності продукту, що є корисним для оцінки ефективності захисних заходів, таких як обфускація. Також обфускація та мінімізація часто використовуються для приховування коду у веб-додатках. У роботі [4, с. 7–10] досліджується, як обфускований та мінімізований код у веб-додатках може використовуватися як для захисту, так і для приховування потенційно шкідливого коду. Обфускація відіграє важливу роль у захисті конфіденційних даних, зокрема в IoT додатках, де виникають значні ризики порушення приватності. У роботі [5, с. 6–14] представлено підхід подвійної обфускації для захисту місцезнаходження в додатках на основі IoT, що дозволяє підвищити рівень безпеки та знизити ризики витоку інформації. З розвитком технологій штучного інтелекту (AI) відкрилися нові можливості для вдосконалення процесу обфускації коду. Однією з головних переваг AI є його здатність адаптуватися до нових загроз і автоматично вибирати найбільш ефективні стратегії захисту. У традиційних методах обфускації часто використовуються статичні підходи, які вимагають ручного налаштування та контролю. Вони можуть бути ефективними на певному етапі, але їхня ефективність знижується, коли змінюються атаки або інструменти для зворотного інжинірингу.

Використання штучного інтелекту дозволяє зробити процес обфускації динамічним. За допомогою машинного навчання та глибинного навчання можна створювати моделі, які аналізують вихідний код і автоматично підбирають найкращі методики для його захисту. Такий підхід не тільки зменшує необхідність у ручній роботі, але й забезпечує більш стійкий захист, оскільки обфускація стає адаптивною і здатною змінюватися відповідно до нових загроз. Штучний інтелект (ШІ) стає невід'ємною частиною сучасних методик обфускації, дозволяючи адаптувати стратегії захисту до нових загроз.

Крім того, AI дозволяє впровадити елемент самонавчання у процес обфускації. Моделі на основі машинного навчання можуть аналізувати успішність застосованих стратегій, адаптуватися до нових умов і вдосконалюватися на основі отриманих даних. Це значно підвищує стійкість програмного забезпечення до атак, оскільки системи обфускації можуть швидко реагувати на нові типи зворотного інжинірингу. Дослідження [6, с. 8] демонструє можливість використання нейронних мереж для аналізу вихідного коду і динамічного створення обфускаційних алгоритмів. Такі моделі забезпечують адаптацію обфускаційних стратегій у реальному часі, залежно від типу коду та виявлених вразливостей. Також слід відзначити внесок роботи [7, с. 22–25], яка описує переваги інтеграції методів ШІ у процесі обфускації на різних етапах розробки програмного забезпечення. Зокрема, використання алгоритмів машинного навчання дозволяє знизити ручне втручання та підвищити ефективність обфускації без значного впливу на продуктивність програм. У статті [8, с. 8] зазначено, що обфускація часто використовується для приховування шкідливого програмного забезпечення в нелегально клонованих додатках, особливо на платформі Android. Однак обфускація також може використовуватися для захисту легітимних додатків від копіювання коду. Автори пропонують кілька моделей глибинного навчання для виявлення та класифікації обфускації у додатках Android. Вони використовують гібридну модель, яка поєднує підходи обробки природної мови та розпізнавання зображень, і досягають значних покращень у порівнянні з попередніми методами виявлення обфускації. Окрім методів захисту, варто враховувати і можливість атак на обфускацію за допомогою машинного навчання. У роботі [9, с. 47–55] розглядається обфускація маршрутизації та аналіз атак з використанням машинного навчання, що

показує можливі слабкі місця в системах обфускації. Штучний інтелект дозволяє не лише покращувати методи обфускації, але й сприяє виявленню шкідливого програмного забезпечення. У роботі [10, с. 80–88] автори досліджують, як AI може бути використаний для посилення методів обфускації, зокрема для ускладнення виявлення шкідливого ПЗ за допомогою обфускованого коду. Штучний інтелект також може бути використаний для виявлення ботнетів у розподілених системах. У роботі [11, с. 190–198] розглядається підхід до виявлення ботнетів, що може бути інтегрований з методами обфускації для підвищення загального рівня безпеки. Машинне навчання є ефективним інструментом для виявлення багатовекторних кіберзагроз. У роботі [12, с. 239] досліджується застосування алгоритмів машинного навчання для аналізу трафіку та виявлення кіберзагроз в середовищі Інтернету речей (IoT), що можна застосувати у поєднанні з методами обфускації для підвищення безпеки. Також AI-методи можуть бути використані для виявлення специфічних загроз, таких як DNS тунелювання ботнетів. У роботі [13] обговорюється підхід до виявлення ботнетів через аналіз DNS тунелювання, що може бути корисним у поєднанні з методами обфускації для захисту розподілених систем від атак. Інші методи штучного інтелекту, такі як згорткові нейронні мережі (CNN), можуть бути ефективними у виявленні шкідливого ПЗ на мобільних платформах. У роботі [14, с. 198–213] описується метод виявлення шкідливого ПЗ на платформі Android, заснований на моделі CNN змішаних даних, що дозволяє ідентифікувати шкідливі програми навіть після їх обфускації.

В результаті використання AI в обфускації дозволяє підвищити рівень захисту, зробити процес більш автоматизованим і ефективним, зменшуючи при цьому вплив на продуктивність програмного забезпечення.

Розглянемо дослідження обфускації в контексті мов програмування високого рівня. Мови програмування високого рівня (такі як Java, мови платформи .NET) використовують проміжний код (IL). Проміжні представлення, як описано в роботі [15, с. 159–207, 221–223], є важливим етапом у процесі компіляції, оскільки вони забезпечують високий рівень абстракції та полегшують аналіз коду. У даній роботі детально описується роль IR (Intermediate Representations) у компіляторах і те, як рішення щодо того, як представляти код, впливає на ефективність обфускації. Це робить їх ключовою точкою вразливості для атак з боку

зловмисників. Саме тому обфускація на рівні ПЛ є критично важливою для захисту програмного забезпечення. Окрім захисту від зворотного інжинірингу, обфускація також може використовуватися для захисту інтелектуальної власності та цифрових контрактів. У роботі [16, с. 439–448] розглядається метод водяних знаків для смарт-контрактів, заснований на обфускації коду, що забезпечує додатковий рівень безпеки та захисту даних у блокчейн-системах. Щоб захистити ПЛ код, використовуються різні методи обфускації, які ускладнюють аналіз коду, але не впливають на його функціональність. На рис. 1 представлена загальна модель компіляції високорівневої мови програмування в ПЛ Code з використанням обфускації. Для прикладу було взято мову програмування високого рівня C#.

Одним із найпоширеніших методів обфускації є перейменування ідентифікаторів. Цей метод змінює назви змінних, класів, методів і інших ідентифікаторів на випадкові або нерозбірливі імена. Це робить аналіз коду складнішим, оскільки зникає семантична інформація, яка могла б допомогти в розумінні призначення компонентів коду.

Ще одним потужним методом є обфускація потоку управління. Вона змінює логіку виконання програми таким чином, що код залишається функціональним, але його виконання стає менш зрозумілим. Наприклад, використовуються фальшиві цикли або додаткові умовні оператори, що ускладнюють аналіз послідовності виконання програми.

Вставка «мертвого» або зайвого коду також є ефективною технікою обфускації. У код додаються блоки, які не впливають на функціональність програми, але роблять її структуру більш заплутаною. Це ускладнює процес реверс-інжинірингу, оскільки додатковий код збільшує складність програми без зміни її поведінки.

Для захисту даних, таких як рядки тексту, використовується шифрування рядків. Це дозволяє уникнути витіку важливої інформації з коду, наприклад, повідомлень про помилки або URL-адрес, що можуть бути витягнуті під час аналізу файлів.

Обфускація ресурсів також відіграє важливу роль у захисті програмних активів, таких як зображення або аудіофайли. Шифрування або модифікація цих ресурсів захищає їх від несанкціонованого доступу або змін.

Використання цих методів обфускації на рівні ПЛ коду є критично важливим для захисту програм. Поеднання різних технік, таких як перейменування ідентифікаторів, обфускація потоку управління та шифрування рядків, забезпечує вищий рівень захисту, особливо коли ці методи використовуються разом із технологіями штучного інтелекту. Штучний інтелект дозволяє автоматизувати процес обфускації, вибираючи оптимальні стратегії для конкретного коду та адаптуючись до нових загроз.

Постановка завдання. Метою цієї статті є розробка, впровадження та аналіз ефективності системи обфускації коду на базі штучного інтелекту для програм на платформі .NET. В умовах постійного зростання кількості атак, спрямованих на реверс-інжиніринг програмного забезпечення, традиційні методи обфускації коду стають все менш ефективними. Тому необхідно розробити новий підхід, який дозволить динамічно адаптувати обфускаційні стратегії до конкретних загроз та підвищити загальний рівень захисту програмного забезпечення.

Основними завданнями статті є:

1. Аналіз існуючих методів обфускації та їхніх обмежень: Необхідно провести огляд традиційних технік обфускації коду, таких як перейменування

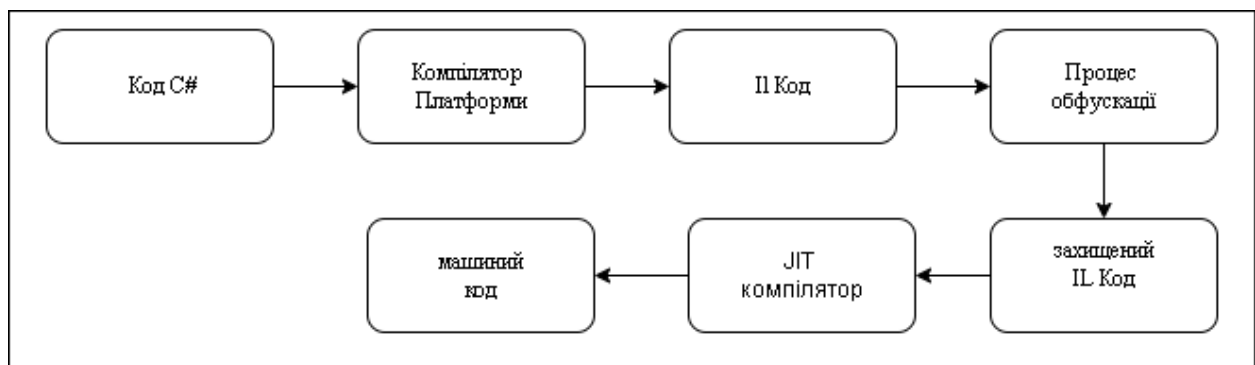


Рис. 1. Узагальнена схема процесу компіляції з використанням обфускації

ідентифікаторів, зміна потоку управління, шифрування рядків та вставка «мертвого» коду. Важливо також виявити недоліки цих методів у контексті захисту програмного коду.

2. Розробка AI-базованої системи обфускації: Метою є створення інтелектуальної системи, що використовує алгоритми машинного та глибокого навчання для вибору та застосування оптимальних методик обфускації в залежності від специфіки вихідного коду. Система має автоматично адаптуватися до нових загроз та покращувати ефективність захисту.

3. Впровадження динамічних методик обфускації на рівні IL коду: Необхідно розробити рішення для обфускації проміжного коду .NET (IL), що ускладнить процес реверс-інжинірингу та декомпіляції. Оскільки IL код є одним із найбільш вразливих елементів .NET програм, його обфускація є критично важливою для підвищення загальної безпеки.

4. Аналіз та інтерпретація отриманих результатів: Оцінка ефективності запропонованої системи обфускації базуватиметься на отриманих експериментальних даних. Важливо виявити, чи AI-базовані методики обфускації покращують захист, зберігаючи при цьому мінімальні втрати продуктивності та функціональності.

5. Визначення напрямків подальших досліджень: На основі отриманих результатів важливо визначити, як можна вдосконалити запропоновану систему. Це може включати дослідження нових моделей машинного навчання, розширення можливостей обфускації для різних типів програмного забезпечення та впровадження додаткових методик захисту.

Основні результати, які передбачається досягти:

1. Підвищення рівня захисту програмного забезпечення: AI-базована обфускація повинна ускладнити декомпіляцію та аналіз програмного

забезпечення, підвищуючи стійкість до реверс-інжинірингу.

2. Автоматизація процесу обфускації: Інтелектуальна система обфускації повинна забезпечити автоматичний вибір стратегій обфускації без необхідності ручного втручання, що дозволить знизити витрати часу та ресурсів.

3. Збереження продуктивності та функціональності: AI-базовані методи повинні зберігати стабільність роботи програмного забезпечення після обфускації, забезпечуючи мінімальний вплив на його швидкодію та функціональні можливості.

Виклад основного матеріалу. Процес обфускації коду є ключовою стратегією захисту програмного забезпечення від зворотного інжинірингу та несанкціонованого аналізу. У традиційних методах обфускації використовуються статичні техніки, такі як перейменування ідентифікаторів, зміна потоку управління, вставка «мертвого» коду або шифрування рядків. Ці методи, хоча й ефективні у певних випадках, часто вимагають ручного втручання та можуть бути обмеженими, коли мова йде про сучасні декомпіляційні інструменти, здатні легко розпізнавати такі зміни. Кожен із методів має свої сильні та слабкі сторони, які залежать від контексту застосування та типу загроз. У цьому розділі проведено порівняльний аналіз найбільш відомих технік обфускації, що допоможе визначити їх ефективність залежно від конкретних вимог до безпеки. Розгляд таких аспектів, як стійкість до атак, вплив на продуктивність, гнучкість та легкість впровадження, дозволяє зробити комплексну оцінку кожного методу. У таблиці нижче наведено основні переваги та недоліки методів, що найчастіше використовуються для захисту коду в різних середовищах програмування.

Для глибшого розуміння ролі AI у процесі обфускації важливо розглянути основні типи методів, які використовуються для захисту коду.

Таблиця 1

Порівняння переваг та недоліків відомих методів обфускації

Метод обфускації	Переваги	Недоліки
Перейменування ідентифікаторів	Легко реалізується, швидко виконання	Легко піддається реверс-інжинірингу з сучасними інструментами
Зміна потоку управління	Ускладнює логіку програми, підвищує захист від реверс-інжинірингу	Може знизити продуктивність та ускладнює підтримку
Вставка «мертвого» коду	Збільшує складність коду та ускладнює аналіз	Може збільшити розмір програми без суттєвого підвищення захисту
Шифрування рядків	Захищає чутливі дані у програмі	Потребує ресурсів для розшифрування під час виконання
Обфускація з використанням ШІ	Динамічна адаптація до нових загроз, підвищена стійкість	Складність реалізації, потребує великих обчислювальних ресурсів

Нижче наведено класифікацію методів обфускації на основі їх характерних рис:

1. За типом трансформації:

1.1. Синтаксичні методи: Включають переіменування ідентифікаторів, що змінює назви змінних, класів, методів, роблячи їх менш зрозумілими. Ці методи є простими у реалізації, але мають обмежену ефективність проти сучасних інструментів реверс-інжинірингу.

1.2. Семантичні методи: Зміна потоку управління і введення «мертвого» коду є прикладами цих методів. Вони ускладнюють аналіз логіки програми, але можуть негативно впливати на продуктивність.

1.3. Шифрування рядків: Метод, що захищає конфіденційні дані всередині програми шляхом їх шифрування.

2. За рівнем коду:

2.1. Обфускація на рівні вихідного коду: Застосовується до коду високого рівня, що полегшує приховування логіки програми на рівні розробки.

2.2. Обфускація на рівні проміжного коду (IL/bytecode): Особливо корисна для таких платформ, як .NET або Java, де програмний код компілюється у проміжний байт-код, що легко декомпілюється.

2.3. Обфускація на рівні машинного коду: Обфускація безпосередньо в бінарних файлах, що знижує ймовірність реверс-інжинірингу на найнижчому рівні.

3. За цілями:

3.1. Заплутування коду: Орієнтоване на те, щоб зробити код менш зрозумілим і важким для аналізу.

3.2. Захист конфіденційних даних: Використовується для шифрування важливих рядків, конфігурацій та даних, що зберігаються всередині програми.

3.3. Захист від реверс-інжинірингу: Комплексні методи, що поєднують кілька технік для ускладнення декомпіляції та подальшого аналізу коду.

4. За динамічністю:

4.1. Статична обфускація: Застосовується під час компіляції і не змінюється під час виконання програми.

4.2. Динамічна обфускація: Використовує AI для модифікації коду під час його виконання, що робить код менш передбачуваним і ускладнює його аналіз в реальному часі.

Метод обфускації за допомогою ШІ може бути класифікований як динамічна комбінована обфускація, оскільки він використовує кілька підходів одночасно і динамічно адаптується до нових загроз. AI-методи також застосовуються

як для вихідного, так і для проміжного коду, що забезпечує універсальність і підвищує рівень захисту програмного забезпечення. Використання штучного інтелекту (AI) у процесі обфускації коду дозволяє значно підвищити ефективність захисту шляхом впровадження динамічної системи, яка адаптується до змінних загроз і нових методів атак. Обфускація з використанням AI включає автоматизоване застосування машинного навчання для вибору та оптимізації обфускаційних стратегій у реальному часі, на основі характеристик проміжного коду (IL). Окрім адаптивних методів обфускації, глибоке навчання може використовуватися для вставки непомітних NOP інструкцій, які не впливають на функціональність програми, але збільшують складність коду. Як зазначено в роботі [17, с. 10], використання глибокого підкріплення для оптимізації вставки NOP інструкцій значно ускладнює зворотний інжиніринг шкідливого програмного забезпечення.

Розглянемо архітектуру системи обфускації на основі штучного інтелекту. Система обфускації, яка використовує штучний інтелект, складається з кількох ключових модулів, кожен з яких відіграє важливу роль у процесі захисту коду. Ці модулі працюють в унісон для забезпечення безпеки та цілісності обфускованого коду.

Модуль введення отримує вихідний код .NET та готує його для подальшого аналізу та обфускації. Модуль попередньої обробки аналізує вихідний код, виконуючи синтаксичний та семантичний аналіз. Модуль ідентифікує критичні частини коду, що потребують додаткового захисту, такі як конфіденційні дані або вразливі ділянки, які можуть бути використані зловмисниками. Модуль обфускації на основі AI є основним компонентом системи. Використовує алгоритми машинного навчання та глибокого навчання для аналізу коду і вибору обфускаційних стратегій. Цей модуль використовує бібліотеку правил обфускації та модуль адаптивного навчання для постійного вдосконалення методик обфускації. Модуль перевірки якості забезпечує те, що обфускований код зберігає свою оригінальну функціональність та виконує тести на стійкість до реверс-інжинірингу. Модуль також перевіряє, чи зросла складність коду. Модуль звітності генерує детальні звіти про процес обфускації, включаючи інформацію про використані методики, ефективність захисту та можливі вразливості.

Взаємодія між компонентами є ключовою для ефективної роботи системи (Рис. 2). Процес розпочинається з отримання вихідного коду в модулі

введення, після чого код передається до модуля попередньої обробки для первинного аналізу. Модуль обфускації, заснований на AI, вибирає відповідні стратегії обфускації та застосовує їх до вихідного коду. Протягом усього процесу бібліотека правил обфускації та модуль адаптивного навчання забезпечують, що обфускаційні методи постійно оновлюються і вдосконалюються відповідно до нових загроз.

Після завершення обфускації, код передається до модуля перевірки якості для тестування на функціональність та стійкість до атак. Після цього результати перевірки зберігаються в модулі зберігання даних разом із обфускованим кодом. Кінцевим етапом процесу є модуль звітності, який генерує звіти, що включають опис використаних стратегій обфускації та їх ефективність. Модуль AI аналізує вихідний код та автоматично вибирає найкращі методи захисту, враховуючи специфіку коду та ймовірні загрози. Крім того, адаптивний модуль навчання постійно вдосконалює методики обфускації на основі нових даних та зворотного зв'язку, що дозволяє системі ефективно протистояти новим атакам.

Використання AI в обфускації коду має кілька важливих переваг:

1. Динамічність і адаптивність. Система може автоматично підлаштовувати свої стратегії обфускації під нові загрози.
2. Автоматизація процесу. Відсутність необхідності у ручному налаштуванні робить процес швидшим і менш схильним до помилок.
3. Поліпшена стійкість до реверс-інжинірингу. Завдяки використанню AI, код стає більш стійким до сучасних методів зворотного інжинірингу.
4. Підтримка високої функціональності. Незважаючи на підвищену складність коду, система забезпечує збереження функціональності обфускованого програмного забезпечення.

Експеримент. Для визначення ефективності обфускації використаємо критерії оцінювання, які описані в роботі [18, с. 10–11].

Для оцінки ефективності AI-базованого підходу був проведений експеримент з використанням 200 .dll та .exe файлів, скомпільованих за допомогою .NET 8. Файли були випадковим чином розділені на дві групи по 100 файлів: контрольна група та експериментальна. Експериментальна група використовувала обфускацію з використанням AI (RNN - TensorFlow.NET [19]), тоді як контрольна група використовувала традиційні методи. Для мануального аналізу і реверс-інжинірингу були використані інструменти [20, 21].

В результаті проведених експериментальних досліджень отримано результати, що підтверджують ефективність запропонованого підходу. За основними критеріями отримано.

1. Стійкість до аналізу. Успішні спроби реверс-інжинірингу в контрольній групі склали 18%, тоді як у експериментальній – лише 5%.
2. Зміна продуктивності. Середній час виконання програм збільшився на 6% у контрольній групі та на 8% у експериментальній.
3. Збереження функціональності. Втрата функціональності складала 2% у контрольній групі та 2,3% у експериментальній.
4. Складність патернів. Обфускація у експериментальній групі ускладнила розпізнавання патернів на 43% у порівнянні з контрольним результатом.

Висновки. Результати дослідження підтверджують ефективність використання AI у процесі обфускації .NET коду. Використання AI дозволяє створювати більш стійкі до зворотного інжинірингу та аналізу програми, оскільки штучний інтелект адаптується до особливостей коду і нових загроз, забезпечуючи динамічний вибір оптимальних стратегій захисту. Результати експе-

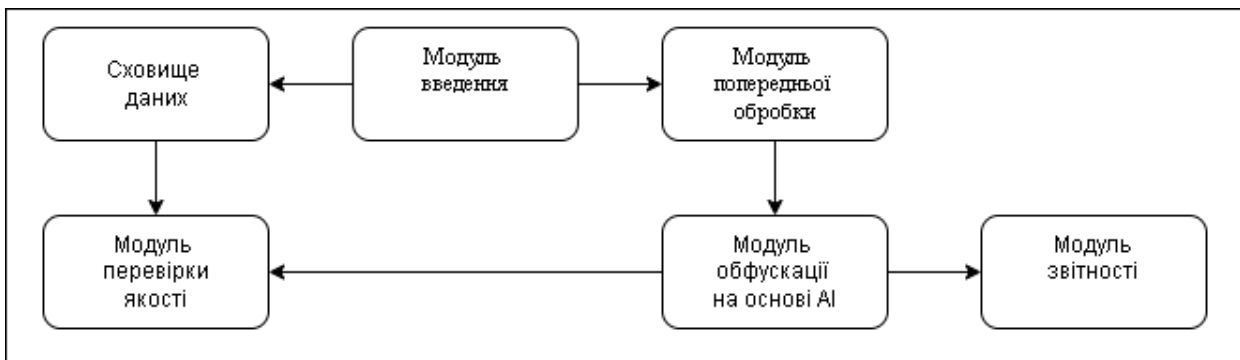


Рис. 2. Основні компоненти інформаційної інтелектуальної системи з обфускацією

Критерії оцінювання методів обфускації

Критерій	Опис	Формула
Стійкість до реверс-інжинірингу	Здатність методу ускладнити процес зворотного інжинірингу та аналізу коду	$S = 1 - \frac{K}{M}$ K – кількість успішного аналізу коду, M – загальна кількість спроб
Вплив на продуктивність	Ступінь, до якого метод обфускації знижує продуктивність програми	$P = \frac{R - L}{L}$ R – час виконання після обфускації, L – час виконання до обфускації
Збереження функціональності	Наскільки добре обфускований код зберігає свою оригінальну функціональність	$F = \frac{N}{M}$ N – кількість не вірних поведінок системи після обфускації, M – загальна кількість функціоналу
Виявлення шаблону	Оцінює здатність автоматичних або ручних інструментів виявляти стандартні патерни (шаблони) в обфускованому коді. Чим менше патернів виявлено (більше значення D), тим краще метод обфускації приховує структуру програми, що підвищує її захищеність.	$D = 1 - \frac{N}{M}$ N – кількість виявлених шаблонів, M – загальна кількість шаблонів

рименту показали, що AI-обфускація значно підвищує рівень безпеки програмного забезпечення без значних втрат у продуктивності та функціональності. Отже основні висновки із цього дослідження включають: підвищена стійкість до зворотного інжинірингу, зростання цикломатичної складності та складності патернів, автоматизація процесу обфускації.

Дослідження, проведене в цій роботі, дозволило досягти подальшого вдосконалення процесу обфускації програмного забезпечення з використанням штучного інтелекту. Основними напрямками подальшого розвитку можуть бути: розширення можливостей AI для обфускації різних типів коду, інтеграція AI-обфускації з іншими методами захисту, використання AI для виявлення нових

загроз. Однією з перспективних галузей є розробка технологій динамічної обфускації, коли код обфускується в режимі реального часу під час виконання. Це дозволить змінювати стратегії обфускації в залежності від дій користувачів або спроб атак. Наприклад, система може реагувати на підозрілі дії шляхом динамічного застосування більш агресивних методик обфускації або шифрування коду. Штучний інтелект може використовуватися не тільки для обфускації, але й для прогнозування нових видів атак. Використовуючи великі масиви даних про атаки, AI може виявляти потенційні вразливості та пропонувати стратегії їх усунення до того, як атака станеться. Це допоможе створити проактивні стратегії захисту, де система самостійно виявляє загрози і адаптується під нові виклики.

Список літератури:

1. Collberg C., Thomborson C., Low D. A taxonomy of obfuscating transformation, The University of Auckland, Department of Computer Science, Technical Report 148, January 1997, https://www.researchgate.net/publication/37987523_A_Taxonomy_of_Obfuscating_Transformations.
2. Nameeza A., Muhammad F. H., Muhammad F. uI H., Paulo C. S. Exploring compiler optimization space for control flow obfuscation, *Computers & Security*, Volume 139, April 2024, <https://doi.org/10.1016/j.cose.2024.103704>.
3. Muhammad A. S., Rianarto S. Cyclomatic Complexity for Determining Product Complexity Level in COCOMO II, *4th Information Systems International Conference 2017, ISICO 2017*, 6-8 November 2017, Bali, Indonesia, Pages 478-486, <https://doi.org/10.1016/j.procs.2017.12.180>.
4. Philippe S., Cristian-Alexandru S., Michael P. Anything to Hide? Studying Minified and Obfuscated Code in the Web, *www '19: The World Wide Web Conference*, 13-17 May 2019, San Francisco CA USA, Pages 7-10, 13, <https://doi.org/10.1145/3308558.3313752>.
5. Sami S. A., Adnan A. Abi S., Abdallah N., Nour M. B., Ahmad B. A., Abdullah A. A Double Obfuscation Approach for Protecting the Privacy of IoT Location Based Applications, *IEEE Access*, Volume 8, 14 July 2020, Pages 129415-129431, <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.3009200>.

6. Yunqi G., Zhaowei T., Kaiyuan C., Songwu L., Ying N. W. A Model Obfuscation Approach to IoT Security, *2021 IEEE Conference on Communications and Network Security (CNS)*, 04-06 October 2021, Tempe, AZ, USA, <https://doi.org/10.1109/CNS53000.2021.9705028>.
7. Minjae P., Geunha Y., Seong-je C., Minkyu P., Sangchul H. A Framework for Identifying Obfuscation Techniques applied to Android Apps using Machine Learning, *Journal of Wireless Mobile Networks, Ubiquitous Computing, and Dependable Applications*, Volume 10, No 4, 31 December 2019, Pages 22-30, <https://isyu.info/jowua/papers/jowua-v10n4-2.pdf>.
8. Mauro C., Vinod P., Alessio V. Obfuscation detection in Android applications using deep learning, *Journal of Information Security and Applications*, Volume 70, November 2022, <https://doi.org/10.1016/j.jisa.2022.103311>.
9. Wei Z., Azadeh D., Rasit Onur T. ObfusX: Routing obfuscation with explanatory analysis of a machine learning attack, *Integration*, Volume 89, March 2023, Pages 47-55, <https://doi.org/10.1016/j.vlsi.2022.10.013>.
10. Christian C., Giorgia S., Nicolò G. T. Enhancing Code Obfuscation Techniques: Exploring the Impact of Artificial Intelligence on Malware Detection, *Product-Focused Software Process Improvement. PROFES 2023. Lecture Notes in Computer Science*, vol 14484. Springer, 2 December 2023, Pages 80–88, https://doi.org/10.1007/978-3-031-49269-3_8.
11. Savenko O., Sachenko A., Lysenko S., Markowsky G., Vasylyuk N. BOTNET DETECTION APPROACH BASED ON THE DISTRIBUTED SYSTEMS, *International Journal of Computing*, 19(2), June 2020, Pages 190-198.
12. Lysenko S., Bobrovnikova K., Kharchenko V., Savenko O. IoT multi-vector cyberattack detection based on machine learning algorithms: traffic features analysis, experiments, and efficiency, *Algorithms* 15(7), 12 July.
13. Savenko B., Lysenko S., Bobrovnikova K., Savenko O., Markowsky G. Detection DNS Tunneling Botnets, *Proceedings of the 2021 IEEE 11th International Conference on Intelligent Data Acquisition and Advanced Computing Systems: Technology and Applications (IDAACS), IDAACS'2021*, September 2021, Pages 22-25.
14. Savenko O., Nicheporuk A., Nicheporuk Y. An android malware detection method based on CNN mixed-data model, *CEUR Workshop Proceedings*, Vol. 2732, 2020, Pages. 198–213.
15. Keith D. C., Linda T. Intermediate Representations. *Engineering a Compiler (Third Edition)*, 20 August 2022, Pages 159-207.
16. Teng H., Jiahui H., Yan P., Hongyang Y. Smart contract watermarking based on code obfuscation, *Information Sciences*, Volume 628, May 2023, Pages 439-448, <https://doi.org/10.1016/j.ins.2023.01.126>.
17. Daniel G., Matt F., Carles M., Jordi P., Quan L. Enhancing the insertion of NOP instructions to obfuscate malware via deep reinforcement learning, *Computers & Security*, Volume 113, February 2022, <https://doi.org/10.1016/j.cose.2021.102543>.
18. Golovko I., Savenko O., Vizhevskiy P., Klein O., Salem, A.-B.M. Obfuscation technologies of high-level source code using artificial intelligence, *CEUR Workshop*, 3736, June 2024, Pages. 324–338.
19. Machine Learning framework for .NET. URL: <https://scisharp.github.io/tensorflow-net-docs/#/>
20. Low-level .NET (ECMA-335) metadata reader and writer. URL: <https://www.nuget.org/packages/System.Reflection.Metadata>
21. Library to generate and inspect programs and libraries in the ECMA CIL format. URL: <https://www.monoproject.com/docs/tools+libraries/libraries/Mono.Cecil/>

Golovko I.G., Savenko O.S., Medzaty D.M., Ivanchenko O.V. ADVANCED TECHNIQUES IN OF SOFTWARE CODE OBFUSCATION USING ARTIFICIAL INTELLIGENCE

This paper explores modern approaches to .NET code obfuscation using artificial intelligence (AI) technologies. Code obfuscation is a critical tool for protecting software from reverse engineering and unauthorized access to source code. Traditional obfuscation methods, such as identifier renaming, control flow modification, and string encryption, have certain limitations as they are static and can be easily bypassed by modern decompilation tools. These methods often require significant time and resources for manual configuration and maintenance. Therefore, there is a need to implement more intelligent approaches that can automatically adapt to new threats.

In this work, we propose an AI-based approach to .NET code obfuscation, which involves using machine learning to analyze and select optimal obfuscation strategies. The main components of the proposed intelligent obfuscation system include an input module, preprocessing module, AI-based obfuscation module, quality verification module, and data storage module. The AI-based obfuscation module utilizes deep learning algorithms to analyze the code structure and select the most effective obfuscation techniques, ensuring a significant increase in code complexity and protection against reverse engineering.

The paper also presents the results of an experimental study aimed at evaluating the effectiveness of the AI-based approach to obfuscation. The experiment was conducted on a sample of 200 .dll and .exe files, compiled by MSBuild tool and divided into control and experimental groups. The obtained results showed a significant increase in resistance to reverse engineering in the experimental group compared to the control group, while maintaining high functionality and minimal impact on software performance.

Thus, the study confirms the effectiveness of using AI in the .NET code obfuscation process. This opens up new possibilities for creating more reliable software protection systems capable of adapting to new cyber threats and ensuring a high level of data confidentiality and integrity. The paper concludes with an outlook on further research prospects in improving learning algorithms and developing new obfuscation techniques using artificial intelligence.

Key words: Code Obfuscation, Software Security, Software Protection, Code Complexity.

Денисюк Д.О.

Хмельницький національний університет

Савенко Б.О.

Хмельницький національний університет

Капитальян А.С.

Хмельницький національний університет

Іванченко О.В.

Національний технічний університет «Дніпровська політехніка»

МЕТОД ВИЯВЛЕННЯ ЗЛОВМИСНОГО ПРОГРАМНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ НА ОСНОВІ АНАЛІЗУ ПОВЕДІНКОВИХ ПАТЕРНІВ СИСТЕМИ

У статті досліджено розробку та оцінювання методу виявлення зловмисного програмного забезпечення, яке використовує стеганографічні зображення для прихованого управління системою із застосуванням технології приманок. Запропонований підхід базується на використанні методів для виявлення стеганографічних змін та методу із застосуванням приманок для виявлення зловмисного програмного забезпечення. Методи LSB і DCT були обрані через їхню здатність приховувати дані в зображеннях, що дозволило використовувати їх у стеганографічних атаках. Під час дослідження проведено серію експериментів для порівняння методів виявлення стеганографічних змін, що дозволило оцінити їх точність, чутливість та швидкість реагування на різні типи зображень, які містять приховані дані. Результати експериментів продемонстрували, що зображення, які містять приховані команди, створені за допомогою методу DCT, виявляються з більшою точністю порівняно з методом LSB.

Хоча метод виявився ефективним, одним із його обмежень є потреба у використанні двох окремих моделей для різних етапів аналізу, що може ускладнити його інтеграцію в системи з обмеженими ресурсами. Використання окремих моделей для виявлення стеганографічних змін та аналізу поведінки системи збільшує навантаження на обчислювальні ресурси, що є критичним для деяких середовищ з обмеженими можливостями. Подальші дослідження будуть спрямовані на оптимізацію підходу шляхом об'єднання цих моделей в єдину систему для зниження обчислювальних витрат і підвищення ефективності. Також, важливим напрямком майбутніх досліджень є інтеграція цього методу з існуючими системами захисту інформації. Це дозволить забезпечити комплексний підхід до захисту інформаційних систем від сучасних загроз, які використовують стеганографічні техніки для приховування своєї активності. Інтеграція з існуючими рішеннями у сфері захисту інформації також дозволить автоматизувати процес виявлення загроз та підвищити загальний рівень захисту системи від стеганографічних атак.

Ключові слова: зловмисне програмне забезпечення, захист інформації, моніторинг аномалій, стеганографічне зображення, приманки, програмні пастки.

Постановка проблеми. З розвитком веб-сервісів та веб-ресурсів питання їхнього захисту від несанкціонованого доступу стає все більш актуальним. Однією з ключових загроз є програмні імпланти та бот-мережі, які можуть порушити безпеку систем. Хоча ці атаки мають певні спільні риси, але програмні імпланти [1, с. 82] виділяються своєю здатністю використовувати специфіку програмного забезпечення для реалізації шкідливих дій. Зокрема, імпланти можуть

експлуатувати бібліотеки, які розробники інтегрують у свій код, або ж використовувати спеціально залишені фрагменти коду подвійного призначення. Наприклад, код, призначений для обробки зображень з метою їх оптимізації, може бути таємно налаштований для виконання шкідливих команд, вбудованих у саме зображення з використанням технології стеганографії. Цей підхід стає дедалі популярнішим серед зловмисників через його приховану природу і складність виявлення.

Оскільки зображення, які містять стеганографію, не можуть бути виявлені звичайним аналізом коду.

Починаючи з 2021 року, загроза програмних імплантів для систем суттєво зросла, особливо у зв'язку з уразливістю програмного забезпечення в ланцюгах постачання [2, с. 275]. Програмні імпланти дозволяють зловмисникам отримувати віддалений контроль над скомпрометованими системами, обходити захист, викрадати дані та запускати додаткові шкідливі програми. Наприклад, під час атак SolarWinds [3, с. 2356] і DNS-угонів, зловмисники використовували програмні імпланти для довготривалого кібер-шпигунства, зокрема для викрадення облікових даних та віддаленого завантаження шкідливих файлів. Інший аспект – це зловмисні програми, які встановлюються через компрометовані ланцюги постачання [4, с. 180] або під час передачі систем між виробником та кінцевим користувачем. Це дозволяє зловмисникам імпантувати зловмисне ПЗ ще до того, як система потрапить до жертви, що значно ускладнює виявлення таких загроз. Таким чином, програмні імпланти несуть велику загрозу для безпеки даних користувача і потребують сучасних методів виявлення таких загроз.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Програмні імпланти є специфічним типом кібератак, для ефективного виявлення яких доцільно використовувати honeypot-системи. Вони класифікуються за рівнем взаємодії на низький, середній та високий [1, с. 6]. Низькорівневі системи емулюють окремі сервіси з мінімальними витратами ресурсів, але збирають обмежені дані [2, с. 30]. Високорівневі системи імітують повноцінні середовища, що дозволяє глибокий аналіз зловмисних дій [3, с. 15228; 4, с. 92]. Середній рівень пропонує баланс між ефективністю та ресурсозатратами [5, с. 475]. Honeypot-системи поділяються на виробничі та дослідницькі. Виробничі використовуються для захисту реальних мереж та виявляють атаки в режимі реального часу [6, с. 522]. Наприклад, Cowrie імітує SSH та Telnet-сервери для збору даних про зловмисну активність [7, с. 6]. Дослідницькі системи, такі як Dionaea, фокусуються на вивченні технік атак [8, с. 87]. Крім того, honeypot-системи застосовуються для виявлення ботнетів за допомогою методів DNS-тунелювання та машинного навчання, що підвищує рівень кібербезпеки [9, с. 25; 10, с. 89]. Розгортання honeypot-систем можливе в різних середовищах, таких як хмарні платформи, демілітаризовані зони (DMZ) або мережі IoT, кожне з яких має свої переваги та виклики

[11, с. 3]. Наприклад, у мережах IoT honeypot-системи допомагають ідентифікувати загрози, але потребують точного налаштування [12, с. 340]. Вибір архітектури honeypot-систем, зокрема вдосконалені сенсори другого та третього покоління, підвищує стійкість до виявлення зловмисниками [13, с. 520]. Зростає кількість атак, що використовують стеганографію для приховування зловмисного коду в зображеннях, що потребує нових підходів для ефективного виявлення та протидії [14, с. 3; 15, с. 67].

Постановка завдання. Метою роботи є створення підходу для виявлення зловмисного програмного забезпечення (ЗПЗ), яке використовує стеганографічні зображення для передачі команд, з акцентом на збільшення точності його ідентифікації на етапі завантаження. Використання методів приманок є ключовим компонентом цього підходу, оскільки вони допомагають імітувати інфраструктуру, націлену на зловмисне ПЗ, що дозволяє перехопити та виявити активність, пов'язану зі стеганографічною передачею команд. Такий підхід має на меті підвищити ефективність виявлення завдяки імітації сценаріїв, у яких зловмисне ПЗ активується при завантаженні зображення, тим самим дозволяючи виявляти приховані загрози ще на ранніх етапах їх діяльності.

Виклад основного матеріалу. Для виявлення ЗПЗ, яке керується через зображення, необхідний комплексний підхід. Перш за все, важливо застосувати методи виявлення стеганографії в зображеннях, щоб встановити, чи може дане зображення містити команди для ЗПЗ. Це дозволить ефективно використовувати ресурси сервера та уникнути зайвого навантаження на систему перевірки. Архітектуру системи виявлення ЗПЗ в зображеннях, засновану на роботі спостерігача, представлено на рис. 1.

Процес роботи методу починається після того, як користувач завантажує зображення на веб-сервер. Після завантаження зображення формату PNG, JPG або JPEG воно перетворюється на матрицю каналів R – червоний, G – зелений, B – синій та A – альфа. Також зберігаються розміри зображення – ширина та висота в пікселях. Після завантаження і декодування кожен піксель представляється 8-бітними значеннями інтенсивності каналів. Математично зображення можна представити наступним чином:

$$I = \{P_{ij} \mid 1 \leq i \leq H, 1 \leq j \leq W\}, \quad (1)$$

де I – вхідне зображення, W – його ширина, H – його висота. P_{ij} – піксель з координатами (i, j) ,

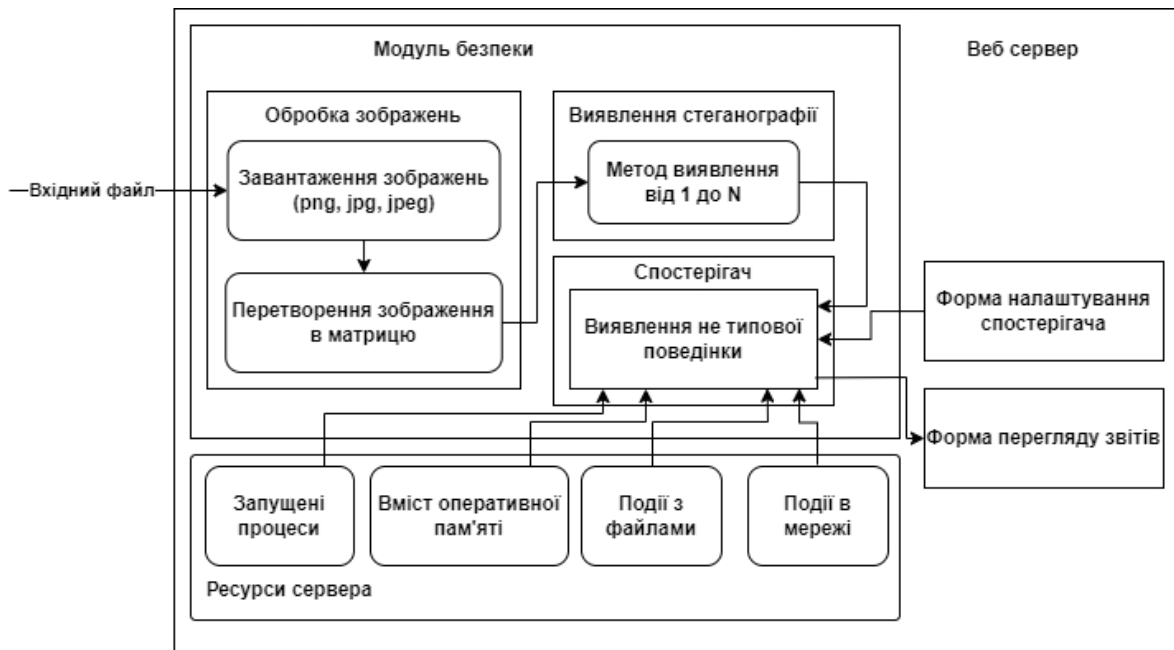


Рис. 1. Архітектура системи виявлення ЗПЗ

який складається з чотирьох компонент $P_{ij} = (R_{ij}, G_{ij}, B_{ij}, A_{ij})$, де $R_{i,j}, G_{i,j}, B_{i,j}, A_{i,j}$ – значення інтенсивностей червоного, зеленого, синього каналів та альфа-каналу відповідно.

Отримана матриця є основою для подальших обчислень, зокрема для застосування алгоритмів виявлення стеганографії. У даному дослідженні було використано два широко відомих підходи для виявлення стеганографічних змін в зображеннях. Перший підхід базується на методі опорних векторів (SVM, Support Vector Machine) [16, с. 1659], який забезпечує класифікацію зображень шляхом побудови оптимальної гіперплощини, що розділяє стеганографічні та нестеганографічні зображення. Цей метод є особливо ефективним для задач, де важлива висока точність класифікації при наявності невеликої кількості навчальних даних. Другий підхід застосовує алгоритм Random Forest [17, с. 560], який використовує ансамбль дерев рішень для аналізу численних параметрів зображення. Завдяки багатократному розподілу і усередненню результатів різних дерев, цей метод дозволяє підвищити стійкість і точність виявлення стеганографічних змін, навіть у випадках складної структури даних. Поєднання цих двох підходів дозволяє значно покращити ефективність системи виявлення, забезпечуючи надійну і точну ідентифікацію прихованих даних в цифрових зображеннях. Метод виявлення стеганографії застосовує алгоритми для аналізу матриці, перевіряючи наявність аномалій або специфічних патер-

нів, які можуть свідчити про присутність стеганографічного контенту.

$$Y = \{M_n, | 1 \leq n \leq K\}, \quad (2)$$

де Y – вихідний набір звітів, що містять інформацію про наявність або відсутність стеганографії в зображенні.

Кожен звіт містить ймовірність виявлення стеганографії, отриману за допомогою методу M_n , де n – номер методу, а K – загальна кількість методів, що брали участь у перевірці. Збільшення кількості методів може призвести до зростання часу обробки. Після виявлення стеганографії метод створює спостерігача для подальшого моніторингу. Спостерігач відстежує процеси, які звертаються до зображення, збирає інформацію про виконувані операції та аналізує використання пам'яті, проводить моніторинг процесів, що звертаються до зображення, а також моніторить вихідні з'єднання. Перед початком роботи спостерігач налаштовується через конфігуратор, що дозволяє виключити безпечні процеси й уникнути хибних спрацьовувань. Конфігуратор визначає параметри для розпізнавання підозрілих дій, встановлюючи допустимі операції з зображеннями та шаблони доступу. Він враховує можливі аномалії, що можуть вказувати на стеганографію, допомагаючи спостерігачу ефективніше виявляти загрози та зменшувати хибні спрацьовування.

Нехай X – вхідне зображення з високою ймовірністю стеганографії. Спостерігач аналізує

набір процесів P , які взаємодіють із зображенням X :

$$P = \{p_1, p_2, \dots, p_n\}. \quad (3)$$

де p_i – окремий процес, що здійснює операції з зображенням. Спостерігач збирає дані про дії A , виконувани кожним процесом p_i :

$$A = \{a_1, a_2, \dots, a_j\}. \quad (4)$$

де a_j – конкретна дія, здійснена процесом p_i .

Конфігуратор C визначає множину параметрів Q , яка характеризує нормальну поведінку процесів щодо зображень:

$$Q = \{q_1, q_2, \dots, q_k\}. \quad (5)$$

де p_k – параметр, що описує допустиму дію або поведінку.

Нехай D множина підозрілих дій. Спостерігач порівнює зібрані дані A з параметрами конфігуратора Q . Якщо дії A не відповідають параметрам Q , спостерігач ідентифікує їх як підозрілі:

$$D = A - Q. \quad (6)$$

Цей підхід дозволяє провести первинний аналіз дій над зображенням для виявлення аномалій. Для прискорення виявлення нетипової поведінки можна застосувати метод співставлення шаблонів. Якщо спостерігач виявляє хоча б одну підозрілу дію, для детального аналізу використовується нейронна мережа. Подальший етап включає аналіз поведінки з використанням нейронної мережі, яка аналізує всі операції, виконувани над зображенням. Операції, що не відповідають визначеним нормам, класифікуються як підозрілі, після чого нейронна мережа виконує точніший аналіз для виявлення прихованих загроз. Метою нейронної мережі є точна ідентифікація прихованих загроз на основі вхідних даних та попередньо виявлених підозрілих дій. Застосування нейронної мережі на другому етапі аналізу значно підвищує точність виявлення стеганографічних актив-

ностей, оскільки вона здатна враховувати складні взаємозв'язки та патерни в даних, які можуть залишатися непомітними для традиційних методів. Таким чином, інтеграція первинного аналізу зі спостерігачем і глибокого аналізу за допомогою нейронної мережі забезпечує комплексний підхід до виявлення стеганографії та підвищує рівень кібербезпеки. Для обробки зображень можуть бути використані згорткові нейронні мережі CNN [18, с. 203] та рекурентні нейронні мережі RNN [19, с. 372].

Використання цього методу дозволяє виявляти та аналізувати стеганографічні активності для ідентифікації програмних імплантів в інформаційних системах. Такий підхід підвищує рівень безпеки, забезпечуючи своєчасне виявлення прихованих загроз і запобігання їхньому впливу.

Експерименти. Для проведення експериментів було підготовлено два набори даних: один містив зображення зі стеганографічними змінами, а інший – зразки ЗПЗ, яке використовувало стеганографію для передачі команд. Для створення стеганографічних зображень застосовувалися методи, такі як метод найменш значущих бітів (LSB) [20, с. 3] та дискретне косинусне перетворення (DCT) [21, с. 36458]. Ці методи були обрані через їх відносну простоту, оскільки вони не вимагають складних обчислювальних операцій з боку ЗПЗ для вилучення прихованих даних. Зокрема, метод LSB забезпечує базовий рівень приховування, тоді як метод DCT є більш стійким до виявлення та атак.

Для моделювання складних поведінкових патернів було розроблено програмне забезпечення, яке виконувало дві основні функції: змінювало розмір зображень та очікувало на отримання нових зображень із прихованими командами, які потім виконувалися. Це програмне забезпечення дозволило вивчити інтерактивну природу взаємодії між стеганографією та зловмисним кодом

Таблиця 1

Результати експериментів з виявлення стеганографічних змін

Метод	Тип	TP	TN	FP	FN	TPR (%)	FPR (%)
LSB	Без команд	120	200	30	50	70.59	13.04
		115	205	35	45	71.88	14.58
	3 командами	120	200	25	40	75.00	11.11
		110	190	25	40	73.33	11.63
		105	185	20	35	75.00	9.76
DCT	Без команд	130	210	15	30	81.25	6.67
		125	195	40	50	71.43	125
	3 командами	145	225	5	15	90.63	2.17
		135	215	15	25	84.38	6.52
		140	220	10	20	87.50	4.35

у реальних сценаріях. Крім того, таке середовище експериментів забезпечувало можливість оцінити ефективність методів виявлення стеганографічних змін та їх стійкість до різних атак.

Результати експериментів підтверджують ефективність методу виявлення нетипової поведінки системи у відповідь на зображення, що містять стеганографічні зміни, створені методами LSB та DCT. Зображення, що містили стеганографію, вбудовану за допомогою методу DCT, продемонстрували вищі показники TPR (True Positive Rate) та нижчі показники FPR (False Positive Rate) у порівнянні з методом LSB. Це свідчить про більшу ефективність виявлення прихованих даних, що були створені методом DCT, а також про його стійкість до хибних спрацьовувань.

Висновки. Дослідження привело до розроблення методу для виявлення ЗПЗ, яке викорис-

товує стеганографічні зображення для керування. Проведені експерименти підтвердили ефективність методу у виявленні різних типів ЗПЗ та стеганографічних змін у зображеннях. Метод швидко реагує на появу зображень зі стеганографією, що дозволяє мінімізувати потенційні ризики.

Серед обмежень методу є використання двох окремих механізмів для аналізу, що може впливати на системи з обмеженими ресурсами, ускладнюючи їх інтеграцію. У подальших дослідженнях планується оптимізувати метод шляхом створення єдиного рішення, що знизить вимоги до обчислювальних ресурсів і підвищить його ефективність у ресурсно обмежених середовищах. Важливим напрямком майбутніх досліджень є також інтеграція цього методу з існуючими системами захисту інформації для покращення захисту від стеганографічних атак.

Список літератури:

1. Yang, X., Yuan, J., Yang, H., Kong, Y., Zhang, H., & Zhao, J. (2023). A highly interactive honeypot-based approach to network threat management. *Future Internet*, 15(4), 127.
2. Bhargavi Movva, R., & Sandeep Chaitanya, N. (2021). Identification of Security Threats Using Honeypots. In *Proceedings of International Conference on Advances in Computer Engineering and Communication Systems: ICACECS 2020* (pp. 273-282). Springer Singapore.
3. Franco, J., Aris, A., Canberk, B., & Uluagac, A. S. (2021). A survey of honeypots and honeynets for internet of things, industrial internet of things, and cyber-physical systems. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 23(4), 2351-2383.
4. Fediushyn, O., Ruzhentsev, V., Fedorov, I., & Moskvina, K. (2021, October). Honeypot Data Storage and Analysis Software to Prevent Intrusions. In *2021 IEEE 8th International Conference on Problems of Infocommunications, Science and Technology (PIC S&T)* (pp. 169-173). IEEE.
5. Bartwal, U., Mukhopadhyay, S., Negi, R., & Shukla, S. (2022, June). Security orchestration, automation, and response engine for deployment of behavioural honeypots. In *2022 IEEE Conference on Dependable and Secure Computing (DSC)* (pp. 1-8). IEEE.
6. Negi, P. S., Garg, A., & Lal, R. (2020, January). Intrusion detection and prevention using honeypot network for cloud security. In *2020 10th International Conference on Cloud Computing, Data Science & Engineering (Confluence)* (pp. 129-132). IEEE.
7. AbuOdeh, M., Adkins, C., Setayeshfar, O., Doshi, P., & Lee, K. H. (2021). A Novel AI-based Methodology for Identifying Cyber Attacks in Honey Pots. *Proceedings of the AAAI Conference on Artificial Intelligence*, 35(17), 15224-15231. <https://doi.org/10.1609/aaai.v35i17.17786>
8. Savenko, O., Sachenko, A., Lysenko, S., Markowsky, G., & Vasylyuk, N. (2020). BOTNET DETECTION APPROACH BASED ON THE DISTRIBUTED SYSTEMS. *International Journal of Computing*, 19(2), 190-198. <https://doi.org/10.47839/ijc.19.2.1761>
9. Shivaprasad, T., Moulya, A. S., & Guruprasad, N. (2024, February). Enhancing Network Security through a Multi-layered Honeypot Architecture with Integrated Network Monitoring Tools. In *2024 11th International Conference on Computing for Sustainable Global Development (INDIACom)* (pp. 473-477). IEEE.
10. Moneva, A., Leukfeldt, E. R., & Romagna, M. (2023). Fieldwork experiences researching cybercriminals. *Fieldwork Experiences in Criminology and Security Studies: Methods, Ethics, and Emotions*, 511-533.
11. Bartwal, U., Mukhopadhyay, S., Negi, R., & Shukla, S. (2022, June). Security orchestration, automation, and response engine for deployment of behavioural honeypots. In *2022 IEEE Conference on Dependable and Secure Computing (DSC)* (pp. 1-8). IEEE.
12. Javadpour, A., Ja'fari, F., Taleb, T., Shojafar, M., & Benzaïd, C. (2024). A comprehensive survey on cyber deception techniques to improve honeypot performance. *Computers & Security*, 103792.
13. B. Savenko, S. Lysenko, K. Bobrovnikova, O. Savenko, G. Markowsky. Detection DNS Tunneling Botnets // *Proceedings of the 2021 IEEE 11th International Conference on Intelligent Data Acquisition and*

Advanced Computing Systems: Technology and Applications (IDAACS), IDAACS'2021, Cracow, Poland, September 22-25, 2021.

14. Priya, V. D., & Chakkaravarthy, S. S. (2023). Containerized cloud-based honeypot deception for tracking attackers. *Scientific Reports*, 13(1), 1437.

15. Lysenko S, Bobrovnikova K, Kharchenko V, Savenko O. IoT multi-vector cyberattack detection based on machine learning algorithms: traffic features analysis, experiments, and efficiency. *Algorithms*. 2022;15(7):239

16. Dong, J., Wang, Z., Wu, J., Cui, X., & Pei, R. (2024). A novel runoff prediction model based on support vector machine and gate recurrent unit with secondary mode decomposition. *Water Resources Management*, 38(5), 1655-1674.

17. Sidharth, V., & Kavitha, C. R. (2021, September). Network Intrusion Detection System Using Stacking and Boosting Ensemble Methods. In 2021 Third International Conference on Inventive Research in Computing Applications (ICIRCA) (pp. 357-363). IEEE.

18. A. Nicheporuk, O. Savenko, A. Nicheporuk, Y. Nicheporuk, An android malware detection method based on CNN mixed-data model, *CEUR Workshop Proceedings*, Vol. 2732, 2020, pp. 198–213

19. Dhruv, P., & Naskar, S. (2020). Image classification using convolutional neural network (CNN) and recurrent neural network (RNN): A review. *Machine learning and information processing: proceedings of ICMLIP 2019*, 367-381.

20. Priyadharshini, A., Umamaheswari, R., Jayapandian, N., & Priyananci, S. (2021, February). Securing medical images using encryption and LSB steganography. In 2021 international conference on advances in electrical, computing, communication and sustainable technologies (ICAECT) (pp. 1-5). IEEE.

21. Song, X., Yang, C., Han, K., & Ding, S. (2022). Robust JPEG steganography based on DCT and SVD in nonsubsampling shearlet transform domain. *Multimedia Tools and Applications*, 81(25), 36453-36472.

Denysiuk D.O., Savenko B.O., Kashtalian A.S., Ivanchenko O.V. METHOD FOR DETECTING MALICIOUS SOFTWARE BASED ON SYSTEM BEHAVIORAL PATTERN ANALYSIS

The paper investigates the development and evaluation of a method for detecting malware that uses steganographic images to covertly control a system using decoy technology. The proposed approach is based on the use of methods for detecting steganographic changes and a decoy method for detecting malware. The LSB and DCT methods were chosen because of their ability to hide data in images, which allowed them to be used in steganographic attacks. During the study, a series of experiments were conducted to compare the methods of detecting steganographic changes, which allowed us to evaluate their accuracy, sensitivity and speed of response to different types of images containing hidden data. The experimental results demonstrated that images containing hidden commands created using the DCT method were detected with greater accuracy compared to the LSB method.

Although the method has proven to be effective, one of its limitations is the need to use two separate models for different stages of analysis, which can make it difficult to integrate into systems with limited resources. Using separate models for detecting steganographic changes and analyzing system behavior increases the load on computing resources, which is critical in some resource-constrained environments. Further research will be aimed at optimizing the approach by combining these models into a single system to reduce computational costs and increase efficiency. Another important area of future research is the integration of this method with existing information security systems. This will provide a comprehensive approach to protecting information systems from modern threats that use steganographic techniques to hide their activity. Integration with existing information security solutions will also automate the threat detection process and increase the overall level of system protection against steganographic attacks.

Key words: malicious software, information security, anomaly monitoring, steganographic image, decoys, software traps.

Дерега А.Ю.

Національний технічний університет «Дніпровська політехніка»

ПРАКТИЧНЕ НАВЧАННЯ ТА СТАЖУВАННЯ СТУДЕНТІВ У ІТ-КОМПАНІЯХ: МОДЕЛІ ВЗАЄМОДІЇ МІЖ ВУЗАМИ ТА ІНДУСТРІЄЮ

Стаття присвячена обговоренню важливості практики та стажування студентів в ІТ-компаніях, акцентуючи увагу на університетах та ІТ-компаніях Дніпра. Доведено, що такий підхід до вищої освіти є важливим для створення якісної та кваліфікованої роботи. Метою статті є розкриття різних моделей взаємодії між університетами та ІТ-компаніями, особливо в місті Дніпрі, щодо практичного навчання та стажування студентів, а також виявлення переваг, проблем та вплив на підготовку ІТ-фахівців. Визначено різні моделі взаємодії між університетами та ІТ-індустрією, з акцентом на тому, як ці моделі впливають на вдосконалення освітніх програм, підвищення рівня працевлаштування студентів та сприяння розвитку інноваційного мислення. Розкрито як стажування та працевлаштування в ІТ-компаніях, зокрема й у Дніпрі, може позитивно вплинути на студентів, які вивчають інформаційні технології. З'ясовано, що ці програми надають їм реальний досвід, який відрізняє їх від інших та збільшує шанси отримати хорошу роботу після закінчення навчання. У статті визначено, що практична освіта важлива для навчального закладу, оскільки дозволяє студентам застосовувати свої теоретичні знання в реальному середовищі та будувати мережу контактів, що є безцінним для їхньої майбутньої кар'єри. У статті визначено, що університети та ІТ-компанії Дніпра співпрацюють над інноваційними та навчальними програмами, що призводить до кращого розуміння потреб ринку та вдосконалення освітніх програм. Акцентовано увагу на важливості співпраці між університетами та ІТ-індустрією для майбутніх студентів. Така співпраця дозволяє студентам отримати реальний досвід та інноваційне мислення, що є важливим для успіху на динамічному ІТ-ринку. Доведено, що якість стажування може бути різною, тому важливо переконатися, що провайдери стажування надають студентам релевантний та корисний досвід. Обговорено, як зробити так, щоб усі студенти, незалежно від їхнього статусу, мали однакові можливості для проходження стажування в ІТ-компаніях. Доведено, що співпраця між університетами та ІТ-індустрією є ключем до створення ефективної та справедливої системи освіти, яка готуватиме якісних професіоналів для майбутнього ІТ-ринку.

Ключові слова: ІТ-освіта, студенти, ІТ-компанії, розвиток ІТ-спеціалістів, ІТ-кластер Дніпра, університет-бізнес, менторство.

Постановка проблеми. На сучасному конкурентному ринку праці важливість практики та стажування для студентів, особливо у сфері інформаційних технологій (ІТ), важко переоцінити. Взаємодія між університетами та промисловістю, особливо в контексті великих ІТ-компаній з офісами в Дніпрі, відіграє ключову роль у підготовці студентів до їх майбутньої кар'єри. У цьому есе досліджуватимуться різні моделі взаємодії між навчальними закладами та ІТ-компаніями, підкреслюючи переваги практичного навчання для підвищення працевлаштування студентів, удосконалення навчальних програм і виховання культури безперервного навчання. І навпаки, він також усуне потенційні недоліки стажування, включаючи якість досвіду роботи, наслідки для академічної успішності та проблеми доступності для студентів.

Аналіз останніх досліджень і публікацій.

Єршов М.О. [1] акцентує на важливості стажування студентів у великих ІТ-компаніях, що є одним із основних шляхів набуття навичок, необхідних на ринку праці, підкреслює, що ці компанії, діячі яких є або працюють у Києві, або мають свої представництва в Дніпрі, відіграють суттєву роль у підготовці висококваліфікованих фахівців.

Фауре Е.В., Заспи Г.О., Сисоєнка С.В. [2] вважають, що успішне впровадження STEM-освіти можливе лише за умов тісної співпраці університетів з підприємствами та ІТ-компаніями. Карий О.І., Гальків Л.І., Цапулич А.Ю. [3] досліджують розвиток ІТ-сфери України, виділяючи фактори та напрями її активізації, відзначають, що ІТ-сектор є одним із найдинамічніших у країні, і його розви-

ток безпосередньо залежить від рівня підготовки фахівців, який можна поліпшувати шляхом організації стажувань у великих ІТ-компаніях. Стисло Т.Р., Ващишак С.П., Бойчук А.М., Стисло О.В., Доценко Я.І. [4] аналізують стан ІТ-ринку України, наголошують на важливості підготовки фахівців, які можуть відповідати вимогам ринку, і тому необхідності міжнародної інтеграції та співпраці у цій сфері. Руденко К.С. [5] розглядає розвиток системи управління персоналом у ІТ-компаніях, стверджує, що підготовка ІТ-фахівців у ЗВО має відповідати потребам ринку, і від цього залежить їхній успіх на працюючих місцях.

Дослідження Рантьока І.І., Вакалюк Т.А. [6] присвячене розробці моделі використання ІКТ управління проектами у процесі неформальної освіти фахівців ІТ-компаній. Це підтверджує актуальність використання інноваційних підходів і технологій у підготовці ІТ-спеціалістів. Полець М.-В.Я. [7] розглядає проблему підвищення рівня мотивації майбутніх ІТ-фахівців у закладах фахової передвищої освіти, акцентує на тому, що використання ІТ-інструментів є одним із ефективних засобів підвищення якості навчання. Найдан О.М. [8] розглядає досвід України щодо поліпшення якості освіти ІТ-студентів, підкреслює, що міжнародний досвід і співпраця є важливими чинниками розвитку ІТ-освіти. Барвінок В.Ю. [9] розглядає сучасні тенденції ІТ-сектора України, підготовку та міграцію ІТ-фахівців, зосереджується на проблемах, які стоять перед Україною, і на необхідності адаптації підготовчих програм під ці зміни.

Всі ці праці демонструють, що ІТ-компанії, як великі міжнародні, так і місцеві з офісами у Дніпрі, є ключовими партнерами університетів у підготовці висококваліфікованих фахівців. Їхня участь у процесі навчання та стажування є невід'ємною частиною підготовки студентів до успішної кар'єри на ІТ-ринку.

Дослідження [10, 11] висвітлює основні проблеми у співпраці між університетами та промисловістю, такі як відмінності в цілях між академічними установами та бізнесом. Наприклад, конфлікти щодо інтелектуальної власності та академічних термінів можуть перешкоджати успіху цих партнерств. Однак, за умов належного управління, такі партнерства сприяють інноваціям, розширенню досліджень та надають студентам цінний досвід роботи в галузі. Різні форми взаємодії, такі як спільне керівництво дипломними роботами, стажування, дослідницькі проекти та обмін персоналом, сприяють подоланню розриву між теоретичною освітою та практичними потре-

бами індустрії. Для ІТ-компаній у таких містах, як Дніпро, така співпраця може допомогти вирішити проблему нестачі талантів, одночасно сприяючи інноваціям [12].

Постановка завдання. Метою статті є всебічне розуміння динаміки між університетами та ІТ-компаніями в Дніпрі.

Виклад основного матеріалу. Практичне навчання значно підвищує можливості працевлаштування студентів, озброюючи їх життєво важливими навичками та досвідом, необхідними на конкурентному ринку праці. По-перше, стажування дає студентам реальний досвід, який відрізняє їх від однолітків. Участь у реальних проектах в ІТ-компаніях дозволяє студентам застосовувати теоретичні знання, отримані в класі, до практичних ситуацій, тим самим розвиваючи глибше розуміння своєї галузі. Цей практичний досвід не тільки підвищує впевненість, але й покращує їхні резюме, роблячи їх більш привабливими кандидатами для потенційних роботодавців [1]. Крім того, навички, набуті під час стажування, такі як мови програмування, розробка програмного забезпечення та усунення несправностей, часто недостатньо висвітлюються в традиційних академічних умовах. Отже, студенти виходять із стажування з набором навичок, який безпосередньо узгоджується з потребами галузі, таким чином значно підвищуючи свою конкурентоспроможність. Крім того, програми стажування створюють безцінні можливості для спілкування. Завдяки взаємодії з професіоналами галузі студенти можуть встановити зв'язки, які можуть привести до працевлаштування після закінчення навчання. Ці відносини часто виходять за межі періоду стажування, забезпечуючи студентів наставництвом і керівництвом, коли вони орієнтуються у своїй кар'єрі. Таким чином, практична підготовка через стажування не тільки сприяє розвитку навичок, але й сприяє розвитку важливих професійних стосунків, кульмінацією яких є покращення працевлаштування студентів, які починають працювати в ІТ.

Практичне навчання та стажування студентів у ІТ-компаніях є важливою складовою підготовки майбутніх фахівців у галузі інформаційних технологій. Між університетами та ІТ-індустрією існує міцне партнерство, яке сприяє обміну знаннями, навичками та інноваціями. У місті Дніпрі, який є одним із провідних ІТ-хабів України, можна знайти кілька відомих компаній, які активно беруть участь у підготовці студентів [2].

Однією із відомих ІТ-компаній з офісом у Дніпрі є «Eram Systems». Компанія відома своїми

інноваційними підходами та якістю освіти, яку вона надає своїм співробітникам, зокрема студентам. Вони працюють із кількома місцевими університетами, щоб надати студентам можливості стажування, проходження навчальних курсів та участі у спільних проектах [3]. Міжнародна співпраця Європейського університету інформаційних технологій «Ерат» та Європейського університету прикладних наук «Ерат» є прикладом успішного партнерства, яке дає можливість студентам отримати практичний досвід, необхідний на ринку праці.

«GlobalLogic» інша велика ІТ-компанія, яка має присутність у місті. Її програми стажування та навчання надають студентам можливість працювати на справжніх проектах, використовуючи останні технології, і отримувати підтримку від досвідчених менторів. Компанія також проводить навчальні програми, хакатони, семінари, майстер-класи, які допомагають студентам розширити свої знання та навички. «COMPARUS UA» є ще одним гравцем на ІТ-ринку Дніпра, який має солідні програми інтернатур. Компанія працює із студентами різних спеціальностей, щоб допомогти їм розвивати професійні навички та отримати досвід роботи на світовому рівні. Інтернати мають можливість працювати над цікавими та викликаючими інтерес проектами, які можуть бути включені до їхніх портфоліо. «Luxoft» також є відомою ІТ-компанією, яка працює у місті. Її освітні програми, такі як «Luxoft Academy», надають студентам доступ до професійної підготовки, яка є актуальною на ринку праці. Під час стажування студенти працюють із професійними інженерами на різних етапах розробки програмного забезпечення, від аналізу вимог до їхнього виконання.

«DataArt» є іншою ІТ-компанією, яка активно співпрацює із ЗВО міста. Компанія підтримує навчальні програми, проводить відбір студентів на стажування, організовує навчальні курси, тренінги, хакатони, що дають можливість отримати якісну підготовку. Працюючи із місцевими університетами, «DataArt» допомагає формувати підготовлений кадровий потенціал. «SoftServe» також є активним учасником освітнього процесу. Компанія має програми підтримки талановитих студентів, які включають стажування, навчання, участь у проектах, співпрацю із університетами. Це створює перетин між академічним світом та індустрією, що є перевагою для студентів, які бажають отримати реальний досвід роботи.

«Ciklum» є ще однією ІТ-компанією, яка надає можливість практичного навчання студентам. Її

програми інтернатури надають студентам можливість працювати на світових проектах, отримувати відгуки від професіоналів, брати участь у технічних конференціях, а також отримувати фінансову підтримку. «N-Ix» є іншим прикладом успішної ІТ-компанії, яка інвестує у розвиток студентів. Компанія працює із університетами міста, щоб підготувати їхніх студентів до кар'єри в ІТ-індустрії. Стажування «N-iX» відомі своїми якісними програмами навчання, підтримкою професійного росту та можливостями роботи на проектах із міжнародними клієнтами.

Взаємодія між університетами та ІТ-компаніями у Дніпрі є прикладом успішної моделі співпраці. Компанії отримують доступ до талановитої молоді, яка має навички, які відповідають їхнім потребам, а університети отримують фінансову підтримку, можливості для розвитку своїх програм, а також можливості для своїх студентів отримати практичний досвід, який є невід'ємною частиною їхньої освіти.

Ці компанії є прикладами того, як ІТ-індустрія може інтегруватися в освітній процес, щоб допомогти студентам підготуватися до майбутньої кар'єри [4]. Відбірковий процес, який вони використовують, дає їм можливість працювати із найкращими студентами, які, у свою чергу, отримують унікальний досвід, який їх відрізняє на ринку праці. Окрім цього, ІТ-компанії також співпрацюють із університетами у проведенні спільних наукових досліджень, організації студентських заходів, підтримці інноваційних стартапів, які створюють студентами. Це сприяє розвитку місцевої ІТ-спільноти, яка є живим організмом, що постійно розвивається і змінюється.

В цілому, ІТ-індустрія Дніпра пропонує студентам різноманітні можливості практичного навчання, стажування та кар'єрного росту. Партнерство між університетами та ІТ-компаніями є прикладом того, як спільні зусилля можуть привести до більшого успіху та розвитку як для студентів, так і для самої індустрії (рис. 1).

Багато ІТ-компаній, таких як EPAM, DataArt та SoftServe, пропонують програми стажування для студентів. Ці програми надають студентам практичний досвід в реальних умовах, працюючи над проектами та співпрацюючи з професіоналами. Кооперативні програми, як ті, що пропонують EPAM та DataArt, дозволяють студентам чергувати академічні семестри з оплачуваною роботою в індустрії. Це дає студентам глибше розуміння індустрії та допомагає їм побудувати професійну мережу. Університети можуть співпрацювати

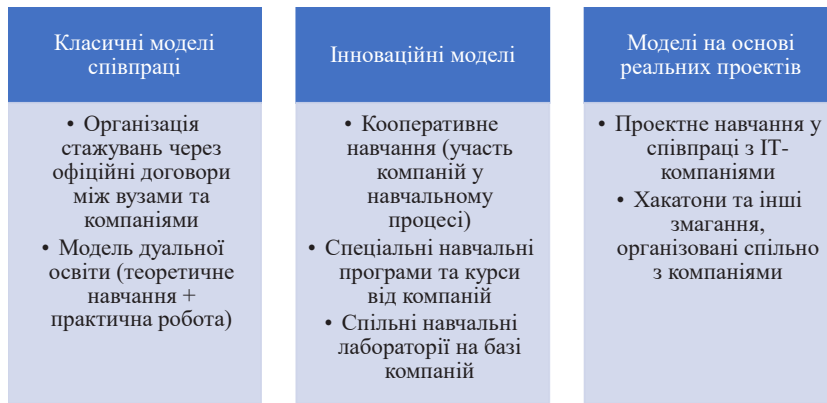


Рис. 1. Моделі взаємодії між закладами вищої освіти та ІТ-компаніями

Джерело: авторська розробка

з ІТ-компаніями для проведення спільних дослідницьких проєктів, надаючи студентам можливість працювати над реальними проблемами та розробляти інноваційні рішення. Багато ІТ-компаній, таких як EPAM та SoftServe, беруть участь у випускних проєктах, де студенти працюють над реальними проєктами для компанії, що надає їм практичний досвід та знайомство з галузевими викликами. ІТ-компанії можуть запрошувати галузевих експертів для проведення гостьових лекцій або воркшопів, надаючи студентам можливість ознайомитися з останніми галузевими тенденціями та технологіями.

Деякі ІТ-компанії, такі як EPAM, пропонують студентам галузеві навчальні програми, що фокусуються на конкретних технологіях або навичках, таких як хмарні обчислення або кібербезпека [5]. Багато ІТ-компаній, таких як DataArt та SoftServe, пропонують програми наставництва, в рамках яких студенти працюють у парі з досвідченими професіоналами, які надають рекомендації та підтримку протягом усього їхнього академічного та професійного шляху. ІТ-компанії можуть проводити хакатони або змагання з кодування, надаючи студентам можливість попрацювати над реальними проблемами та розробити інноваційні рішення. Університети можуть співпрацювати з ІТ-компаніями для проведення дослідницьких проєктів, надаючи студентам можливість працювати над реальними проблемами та розробляти інноваційні рішення. ІТ-компанії можуть брати участь у ярмарках кар'єри та рекрутингових заходах, надаючи студентам можливість поспілкуватися з професіоналами галузі та дізнатися про можливості працевлаштування.

Співпраця між університетами та ІТ-компаніями відіграє вирішальну роль у вдо-

сконаленні навчальних програм, гарантуючи, що освітні програми залишаються актуальними та відповідають вимогам галузі [6]. По-перше, відгуки професіоналів галузі є життєво важливим ресурсом для університетів, що дозволяє їм адаптувати свої курси відповідно до поточних потреб ринку. Враховуючи ідеї досвідчених ІТ-фахівців, навчальні заклади можуть оновити свої навчальні програми, щоб відобразити останні технологічні досягнення та методології, гарантуючи, що студенти отримують необхідні знання та навички. Крім того, спільні проєкти між університетами та ІТ-компаніями можуть ефективно подолати розрив між теоретичними знаннями та практичним застосуванням. Коли студенти беруть участь у спільних проєктах, вони на власні очі відчувають проблеми та динаміку роботи в професійному середовищі, тим самим зміцнюючи своє навчання. Крім того, спільні дослідницькі ініціативи можуть сприяти інноваціям і підтримувати актуальність академічних програм. Оскільки ІТ-компанії часто працюють на передньому краї технологій, їхня співпраця з університетами може призвести до новаторських досліджень, які принесуть користь обом сторонам. Ця синергія не тільки покращує навчальний досвід для студентів, але й сприяє загальному розвитку ІТ-індустрії. Підсумовуючи, партнерство між університетами та ІТ-компаніями відіграє важливу роль у вдосконаленні навчальних програм, гарантуючи, що студенти добре підготовлені до виконання вимог технологічного середовища, що постійно розвивається.

Стажування сприяє формуванню культури безперервного навчання та адаптації, що є важливим для студентів, які готуються вступити в сферу інформаційних технологій, яка швидко зміню-

ється [7]. Познайомлення зі стрімким технологічним ландшафтом під час стажування готує студентів впевнено вирішувати майбутні виклики. Оскільки технології продовжують розвиватися, здатність адаптуватися та вивчати нові навички стає все більш важливою. Стажування дає студентам можливість зануритися в це динамічне середовище, сприяючи розумінню навчання протягом усього життя. Крім того, стажування розвиває навички спілкування, які часто не помічаються в академічному середовищі. Навички спілкування, командної роботи та вирішення проблем є критично важливими на будь-якому робочому місці, а стажування дає студентам можливість розвинути ці здібності через спільні проекти та взаємодію з колегами [8]. Коли студенти працюють разом із професіоналами, вони дізнаються важливість ефективного спілкування та співпраці для досягнення спільних цілей. Нарешті, стажування знайомить студентів з корпоративною культурою та динамікою робочого місця, сприяючи їхньому переходу на повний робочий день. Розуміння етикету на робочому місці, професійних очікувань і нюансів командної динаміки озброює студентів інструментами, необхідними для процвітання в їхній майбутній кар'єрі. Підсумовуючи, стажування не тільки сприяє безперервному навчанню та адаптації, але й розвиває необхідні навички спілкування, готуючи студентів до успішної інтеграції в робочу силу.

Незважаючи на численні переваги стажування, важливо визнати, що не всі стажування забезпечують значущий досвід роботи. У деяких випадках студенти можуть виявляти, що виконують чорні завдання, які не сприяють розвитку їхніх навичок чи професійному зростанню [9]. Наприклад, стажерам можуть бути призначені такі завдання, як введення даних або реєстрація, які не використовують свою академічну підготовку або не надають можливостей для навчання. Відсутність значущої роботи може призвести до розчарування та розчарування, оскільки студенти можуть відчувати, що їхній час і зусилля не цінуються. Крім того, якість нагляду під час стажування може значно відрізнятись, причому деякі студенти відчують брак керівництва чи наставництва [10]. Без належного нагляду стажери можуть почуватися втраченими або непродуктивними, що призводить до зменшення досвіду навчання. Крім того, існує ризик того, що компанії можуть експлуатувати стажерів, використовуючи їх як джерело дешевої робочої сили, а не надавати цінні можливості для навчання та розвитку. У таких сценаріях стажу-

вання може стати вправою праці, а не значущим освітнім досвідом. Тому, хоча стажування може бути корисним, важливо критично оцінювати його якість і цінність, яку вони пропонують студентам.

Інше важливе занепокоєння щодо наголосу на стажуванні полягає в тому, що це може відволікати від академічного навчання [11]. Прагнучи отримати цінні місця для стажування, студенти можуть надавати перевагу практичній підготовці над курсовою роботою, що потенційно може призвести до зниження успішності. Це зміщення фокусу може призвести до неповного розуміння основоположних концепцій, які мають вирішальне значення для успіху в сфері ІТ. Крім того, тиск з метою забезпечення стажування може викликати стрес і занепокоєння серед студентів, ускладнюючи їхнє академічне навантаження. Конкурсний характер стажування може призвести до нездорової одержимості практичним досвідом за рахунок академічної майстерності. Крім того, надмірна залежність від практичної підготовки може підірвати важливість теоретичних знань. Хоча практичний досвід є безцінним, він повинен доповнювати, а не замінювати теоретичні основи, які лежать в основі ІТ-індустрії. Повне розуміння як теорії, так і практики має важливе значення для створення всебічно розвинених професіоналів, які можуть орієнтуватися в складнощах своєї галузі. Підсумовуючи, хоча стажування є важливою складовою підготовки студентів, надмірна увага до них може мати шкідливий вплив на академічну успішність і збалансоване навчання.

Важливо також визнати, що не всі університети встановили партнерські відносини з ІТ-компаніями, що може створювати диспропорції в доступності стажування для студентів [12]. У менших університетів може не вистачати ресурсів або зв'язків, необхідних для стажування у великих ІТ-компаніях, залишаючи студентів у невідгядному становищі щодо доступу до цінних можливостей навчання. Ця нерівність може обмежити кар'єрні перспективи студентів із закладів з меншими ресурсами, оскільки вони можуть не мати такого ж рівня впливу на галузеву практику та мережі, як їхні однолітки з добре зв'язаних університетів. Географічні обмеження ще більше загострюють цю проблему, оскільки студенти в деяких регіонах, можуть зіткнутися з труднощами під час отримання стажування у великих ІТ-компаніях, які переважно розташовані у великих містах. Відсутність різноманітних можливостей стажування може перешкодити студентам отримати практичний досвід, тим самим

впливаючи на їх працевлаштування після закінчення навчання. Крім того, відмінності в доступності стажування можуть призвести до нерівного доступу до практичної підготовки для студентів з різного походження, увічнюючи цикли нерівності на ринку праці. Тому, незважаючи на те, що стажування може дати цінний досвід, важливо усунути системні перешкоди, які обмежують доступ до цих можливостей для всіх студентів.

Висновки. На завершення можна сказати, що взаємодія між університетами та ІТ-компаніями через практичне навчання та стажування відіграє вирішальну роль у формуванні майбутнього студентів в ІТ-індустрії. Хоча переваги стажування, такі як покращення працевлаштування, вдосконалені навчальні програми та розвиток основних

навичок, є значними, не менш важливо визнати потенційні недоліки. До них належать якість досвіду роботи, вплив на академічну успішність і відмінності в доступі до можливостей стажування. Збалансований підхід необхідний для забезпечення того, щоб стажування слугувало значущим доповненням до академічного навчання, надаючи студентам інструменти, необхідні для процвітання у їхній майбутній кар'єрі. Сприяючи міцному партнерству між навчальними закладами та промисловістю, зацікавлені сторони можуть працювати над створенням більш справедливої та ефективної системи, яка стане основою для подальших досліджень і принесе користь усім студентам у галузі інформаційних технологій, що швидко розвивається.

Список літератури:

1. Ершов М.О. Тенденції розвитку ІТ-освіти в Незалежній Україні : монографія. Київ : «Видавництво Людмила», 2023. 350 с. URL: <http://eprints.zu.edu.ua/38844/1/Ershov.pdf> (дата звернення: 01.09.2024).
2. Фауре Е.В., Заспа Г.О., Сисоєнко С.В. Впровадження STEM-освіти в освітні програми закладів вищої освіти через кооперацію з підприємствами та компаніями. *Вісник Черкаського державного технологічного університету*. 2021. № 4. С. 25–34. DOI: 10.24025/2306-4412.4.2021.251630.
3. Карий О.І., Гальків Л.І., Цапулич А.Ю. Розвиток іт-сфери України: чинники та напрями активізації. *Journal of Lviv Polytechnic National University Series of Economics and Management Issues*. 2021. Vol. 5. No. 1. С. 42–55. DOI: <http://doi.org/10.23939/semi2021.01.042>.
4. Стисло Т.Р., Ващишак С.П., Бойчук А.М., Стисло О.В., Доценко Я.І. Аналіз стану ІТ ринку України. *Вісник Хмельницького національного університету*. 2022. № 1. С. 43–49. DOI: 10.31891/2307-5732-2022-305-1-43-47.
5. Руденко К.С. Розвиток системи управління персоналом в ІТ-компаніях. Економіко-правовий розвиток сучасної України : матеріали XI Всеукраїнської наукової конференції студентів, аспірантів та молодих вчених, що присвячена 25-й річниці з дня заснування Національного університету «Одеська юридична академія» (м. Одеса, 25 листопада 2022 р.) / за ред. О.М. Кібік. Одеса, 2022. С. 179–181. URL: <https://dspace.onua.edu.ua/items/5e4da92d-df74-408f-be57-6ac46c1056b7> (дата звернення: 02.09.2024).
6. Рантюк І.І., Вакалюк Т.А. Розробка моделі використання ІКТ управління проектами у процесі неформальної освіти фахівців ІТ-компаній. *Інформаційні технології і засоби навчання*. 2023. Том 98, № 6. С. 164–176. DOI: <https://doi.org/10.33407/itlt.v98i6.5288>.
7. Полець М.-В. Я. Підвищення рівня мотивації майбутніх ІТ-фахівців в закладах фахової передвищої освіти. *Академічні візії*. 2024. Вип. 32. 8 с. DOI: <https://doi.org/10.5281/zenodo.11545074>.
8. Haitan O.M. Improving the Quality of IT Students Education: the Ukrainian Experience. Proceedings on 12th International Conference on Advanced Computer Information Technologies (ACIT). Spišská Kapitula, Slovakia, 26-28 September 2022. Spišská Kapitula, 2022. P. 597–600. URL: <https://reposit.nupp.edu.ua/handle/PoltNTU/10940> (дата звернення: 04.09.2024).
9. Барвінок В.Ю. Сучасні тренди та проблеми ІТ-сектора в Україні: підготовка та міграція ІТ-фахівців. *Механізм регулювання економіки*. 2020. № 4. С. 90–102. DOI: <https://doi.org/10.21272/mer.2020.90.07>.
10. Rossoni A.L., de Vasconcellos E.P.G., de Castilho Rossoni R.L. Barriers and facilitators of university-industry collaboration for research, development and innovation: a systematic review. *Manag Rev Q*. 2024. № 74. PP. 1841–1877. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11301-023-00349-1>.
11. O'Dwyer M., Filieri R., O'Malley L. Establishing successful university–industry collaborations: barriers and enablers deconstructed. *J Technol Transf*. 2023. № 48. PP. 900–931. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10961-022-09932-2>.
12. Sun J., Turner H. The Complementarity Investment in University-Industry Collaboration. *Innov High Educ*. 2023. № 48. PP. 539–556. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10755-022-09641-6>.

Dereza A.Yu. PRACTICAL TRAINING AND INTERNSHIPS FOR STUDENTS IN IT COMPANIES: MODELS OF INTERACTION BETWEEN UNIVERSITIES AND INDUSTRY

The article discusses the importance of student internships and internships in IT companies, focusing on universities and IT companies in Dnipro. It is proved that such an approach to higher education is important for creating high-quality and skilled work. The purpose of the article is to reveal different models of interaction between universities and IT companies, especially in the city of Dnipro, in terms of practical training and internships for students, as well as to identify the advantages, problems and impact of the training of IT specialists. Different models of interaction between universities and the IT industry are identified, with an emphasis on how these models affect the improvement of educational programs, increase the level of student employability, and promote the development of innovative thinking. The article shows how internships and employment in IT companies, including those in Dnipro, can positively impact students studying information technology. It has been found that these programs provide them with real-world experience that distinguishes them from others and increases their chances of getting a good job after graduation. The article determines that practical education is important for an educational institution because it allows students to apply their theoretical knowledge in a real environment and build a network of contacts, which is invaluable for their future careers. The article identifies that universities and IT companies in Dnipro cooperate on innovative and educational programs, which leads to a better understanding of market needs and improvement of educational programs. The importance of cooperation between universities and the IT industry for future students is emphasised. Such cooperation allows students to gain real-world experience and innovative thinking, which is important for success in the dynamic IT market. It is proved that the quality of internships can vary, so it is important to make sure that internship providers provide students with relevant and useful experience. It is discussed how to ensure that all students, regardless of their status, have equal opportunities for internships in IT companies. It is proved that cooperation between universities and the IT industry is the key to creating an effective and fair education system that will train quality professionals for the future IT market.

Key words: *IT education, students, IT companies, development of IT specialists, Dnipro IT cluster, university-business, mentoring.*

Завгородній В.В.

Державний університет інфраструктури та технологій

Завгородня Г.А.

Державний університет інфраструктури та технологій

Васильєв С.В.

Державний університет інфраструктури та технологій

Прусов В.О.

Державний університет інфраструктури та технологій

РОЗРОБКА МЕТОДОЛОГІЇ ДЛЯ АНОНІМНОСТІ КОРИСТУВАЧІВ ТА ПРОТИДІЇ ВІДСТЕЖЕННЮ ОНЛАЙН

Робота присвячена розробці рішення для забезпечення анонімності користувачів, зокрема тих, хто не володіє технічними знаннями, але має потребу приховати свою особу в Інтернеті. Вихідна система передбачає, що інтернет-провайдер має доступ до ідентифікації користувача, а робоча станція (найімовірніше, ОС Windows) використовується для повсякденних завдань.

У роботі було проведено низку ключових етапів, що включали збір та аналіз сучасної теоретичної інформації, вивчення наявних рішень-аналогів, проектування практичного рішення та серію експериментів для оцінки його ефективності. Основною метою дослідження було розробити комплекс програмного забезпечення, що забезпечує високий рівень анонімності користувачів в Інтернеті та захист від різних методів відстеження й ідентифікації.

У роботі було запропоновано використання схеми «VPN через Tor» для ефективного маскування користувачького трафіку. Така конфігурація дозволяє видавати VPN-адресу замість Tor, що робить трафік менш підозрілим для зовнішніх систем. Замість стандартного Tor Browser пропонується використовувати модифікований Firefox з відповідними налаштуваннями для анонімності. Chromium-браузери відхиляються, оскільки Firefox має ширший спектр конфіденційних налаштувань, таких як протидія фінгерпринтингу та можливість налаштування приватних даних.

У результаті роботи було підібрано, налаштовано і протестовано програмний комплекс, який найбільш ефективно вирішує поставлені завдання. Основні функціональні можливості системи включають приховування та підміну даних користувача, шифрування та обфускацію трафіку, маскування використання засобів анонімізації, ізоляцію веб-браузера від основної операційної системи, а також захист від витоків реальних даних.

Для посилення захисту запропоновано використовувати віртуальні машини з ОС Windows, що забезпечує додатковий рівень ізоляції від можливих атак та витоків даних. Для анонімізації трафіку через Tor рекомендується використовувати Whonix-Gateway з протоколом obfs4, який забезпечує протидію аналізу DPI.

Ключові слова: інформаційна безпека, анонімність, захист від відстеження, шифрування, Інтернет.

Постановка проблеми. Проблема анонімності в Інтернеті існувала з самого початку його створення, але набула особливої актуальності в 2013 році після викриттів Едварда Сноудена. Він оприлюднив інформацію про програми глобального стеження, зокрема систему PRISM, що продемонструвало безпрецедентне втручання у приватне життя громадян.

На сьогоднішній день розробка та використання програмних засобів для анонімності та захисту відстеження в Інтернеті є актуальною проблемою.

Попри популярність VPN-сервісів і анонімайзерів, багато з них мають суттєві недоліки.

1. Комплексність забезпечення анонімності – багато сервісів вирішують завдання частково. Навіть у мережі TOR, яка вважається безпечною, траплялися випадки ідентифікації користувачів. VPN-провайдери можуть зберігати історію дій та передавати її державним службам.

2. Зниження зручності – анонімізація може впливати на швидкість з'єднання та функціональність браузера. Деякі сайти блокують IP-адреси

TOR, а відключення JavaScript та Cookies може ускладнювати роботу.

3. Непомітність – використання анонімізуючих інструментів часто може привернути увагу. Більшість сервісів не забезпечують повної непомітності.

4. Складність використання – багато інструментів важко налаштовувати, що вимагає глибоких технічних знань. Це обмежує їх використання для звичайних користувачів.

Також існує проблема браку авторитетних наукових публікацій з цієї теми, особливо українськомовних. Інформація часто доступна на форумах і в анонімних мережах, що лише підкреслює актуальність проблеми анонімності в Інтернеті.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. На перший погляд, дана тематика переважно висвітлюється на неофіційних інтернет-ресурсах, проте існує чимало наукових робіт, що досліджують вразливості анонімних мереж, методи ідентифікації пристроїв та розробку нових способів захисту від сучасних методів стеження.

Дослідження [1] аналізує можливі атаки в мережі Tor та демонструє одну з них. Статті [2–5] вивчають поведінку складних ланцюжків проксі-серверів та розглядають слабкі місця Tor, альтернативи та можливість використання Skype через цю мережу.

У публікації [6] представлено інструмент для випадкової заміни даних браузера з метою уникнення ідентифікації. У 2017 році дослідники зі США в статті [7] описали техніку точного розпізнавання комп'ютерів незалежно від браузера, рекомендувавши використовувати Tor Browser для протидії такому стеженню. У дослідженні приділено увагу методам фінгерпринтингу, зокрема WebGL.

Дослідження [8] аналізує сучасні методи відстеження в Інтернеті. Інтернет-ресурс The Free Haven пропонує велику колекцію статей на тему анонімності та шифрування. Зокрема, стаття [9] аналізує трафік мережі Tor, опублікована Військово-морською дослідною лабораторією США.

Роботи [10–12] охоплюють теми шифрування файлів, використання менеджерів паролів, захисту від вірусів, анонімних мереж та інше. Також детально розглядаються Tails і PGP. Стаття [13] у спрощеній формі пояснює роботу Tor, I2P, шифрування файлів та електронної пошти.

Наведені дослідження є важливими кроками на шляху до забезпечення анонімності, але питання повного захисту користувачів від сучасних загроз залишається актуальним.

Постановка завдання. Основна мета дослідження – оцінити можливість створення засобу анонімізації, який максимально поєднує надійність, зручність, непомітність та простоту налаштування. Оскільки ці якості часто конфліктують між собою (підвищення безпеки може знизити зручність), дослідження має визначити межі їх сумісності та способи реалізації. Планується проектування програмного продукту для практичного використання.

Виклад основного матеріалу. Для забезпечення анонімності широкому колу користувачів (враховуючи, що потреба в ній може виникнути не лише у технічно підкованих осіб), виходимо з припущення, що вихідна система не є анонімною: інтернет-провайдер знає особу користувача, комп'ютер використовується для повсякденних завдань, і, ймовірно, працює під ОС Windows. Передбачається використання платних сервісів, таких як надійний VPN або VPS. Основні вимоги до рішення:

- приховати від сайтів усі дані, що стосуються вихідної системи та браузера;
- забезпечити шифрування трафіку для обходу моніторингових систем провайдера;
- надати можливість змінювати цифрові відбитки користувача;
- запобігти витoku реальної IP-адреси через анонімний браузер;
- маскувати використання засобів анонімізації від сайтів та систем аналізу трафіку;
- зробити рішення легким у встановленні та налаштуванні.

Не всі вимоги є критичними – наприклад, маскування VPN або Tor може бути опціональним, якщо провайдер їх не блокує. Крім того, не всі сайти виявляють анонімізаційні засоби або перевіряють правдоподібність цифрових відбитків. Однак розроблене рішення намагається максимально врахувати всі ці вимоги для ефективної анонімізації користувача.

З огляду на мету – максимально приховати факт використання засобів анонімізації – застосування Tor Browser є небажаним, оскільки його легко виявити, що може привернути небажану увагу. Для цього пропонується використовувати схему «VPN через Tor», яка забезпечує IP-адресу VPN-сервера на виході, що виглядає менш підозріло порівняно з адресами, пов'язаними з Tor. Використовувати Tor Browser в такій конфігурації складно, оскільки він налаштований виключно на передачу трафіку через мережу Tor і не підтримує інші проксі-налаштування. Крім того, Tor Browser має характерні цифрові відбитки, що також може викликати підозри.

Тому для нашої задачі більш доцільно використовувати звичайний Firefox із відповідними змінами в конфігурації, які дозволять підлаштувати браузер під потреби анонімної роботи. Браузери на основі Chromium не розглядаються, оскільки для анонімної діяльності зазвичай рекомендується саме Firefox. Це обумовлено як репутацією Mozilla, яка активно підтримує конфіденційність користувачів, так і широкими можливостями для налаштування браузера під специфічні вимоги анонімізації.

У таблиці 1 наведено основні установки конфігурації браузера Firefox для забезпечення анонімності та захисту від відстеження.

Ці параметри налаштовують Firefox для максимального приховування активності користувача та мінімізації витоків інформації, що може бути використано для відстеження.

Крім основних налаштувань, існує багато додаткових параметрів, що можуть підвищити рівень захисту. Головна мета цих налаштувань – запобігти витoku другорядних даних, зберігаючи функціональність браузера без змін. Наприклад, відключення телеметрії допомагає підвищити конфіденційність, а вимкнення WebRTC запобігає витoku реальної IP-адреси, але може свідчити про використання засобів анонімізації, чого краще уникати.

Таблиця 1

Основні установки конфігурації браузера Firefox для забезпечення анонімності та захисту від відстеження

Параметр	Значення	Опис	Примітки
privacy.resistFingerprinting	true	Включення захисту від відстеження через цифрові відбитки	Не рекомендується через ідентичність з відбитками Tor Browser
privacy.firstparty.isolate	true	Ізоляція контенту для запобігання відстеженню через Cookies	Може викликати проблеми на деяких сайтах
browser.safebrowsing.enabled	false	Вимкнення Safe Browsing для захисту від передачі даних на Google	Збільшує ризик зараження шкідливим ПЗ
browser.safebrowsing.downloads.enabled	false	Вимкнення Safe Browsing для завантажених файлів	
browser.safebrowsing.malware.enabled	false	Вимкнення захисту від шкідливих сайтів	
browser.search.suggest.enabled	false	Заборона передачі введеного тексту в пошукову систему без підтвердження	
dom.enable_performance	false	Вимкнення передачі даних про продуктивність завантаження сторінок	
network.dns.disablePrefetch	true	Вимкнення попередньої обробки DNS для посилань на сторінці	
dom.battery.enabled	false	Заборона відстеження рівня заряду батареї	
dom.network.enabled	false	Відключення передачі даних про тип мережевого підключення	
media.peerconnection.enabled	false	Відключення WebRTC для захисту від витoku IP-адреси	Альтернатива: опція в uBlock для запобігання витoku.
geo.enabled	false	Відключення геолокації	
media.navigator.enabled	false	Заборона доступу до мікрофона та камери	
media.navigator.streams.fake	true	Генерація фейкового аудіо та відеосигналу для підміни реальних даних	
webgl.disable-extensions	true	Обмеження функцій WebGL для захисту від передачі даних про систему	Можна повністю вимкнути WebGL
webgl.min_capability_mode	true	Зменшення функціональності WebGL для обмеження доступу до даних	
privacy.trackingprotection.enabled	true	Включення захисту від відстеження	Можна використовувати uBlock з додатковими фільтрами
general.useragent.override	<рядок>	Підміна User-agent для маскуванню браузера	Зручніше використовувати розширення для цієї задачі
dom.webaudio.enabled	false	Вимкнення AudioContext API для захисту від аудіо-відбитків	Можна використовувати доповнення для захисту
layout.css.visited_links_enabled	false	Вимкнення виділення відвіданих посилань для захисту від трекінгу	

Джерело: складено авторами

У налаштуваннях Firefox рекомендується активувати режим «Завжди працювати в приватному перегляді». Хоча цей режим не гарантує повної анонімності, він є ефективним для боротьби з Evercookie, оскільки всі збережені ідентифікатори автоматично видаляються після закриття браузера. Теоретично, можна відключити кеш та локальне сховище, але це може спричинити проблеми з роботою браузера. У вкладці «Приватність» варто заборонити cookies зі сторонніх сайтів, а в додаткових налаштуваннях – повністю відключити телеметрію. Головні моменти щодо налаштувань та розширень для анонімності у Firefox:

1. Протидія фінгерпринтингу: Firefox має вбудовані опції протидії «фінгерпринтингу», які активуються через налаштування privacy.resistfingerprinting. Однак цей режим не використовується, оскільки деякі відбитки збігаються з Tor Browser, а також він змінює часовий пояс на UTC, що не підходить для нашого випадку.

2. Важливі браузерні доповнення:

– CanvasBlocker: блокує або заміняє відбиток Canvas fingerprint, генерує випадкові дані для кожної сторінки;

– NoScript: блокує виконання небезпечних компонентів JavaScript, Java, Flash, захищає від XSS-атак;

– uBlock Origin: блокує рекламу, відстежувальні елементи, може захистити від фінгерпринтингу та витоків IP через WebRTC;

– Decentraleyес: захищає від відстеження через CDN, використовуючи локальні ресурси;

– Privacy Badger: блокує трекери та самонавчається;

– HTTPS Everywhere: примусово використовує HTTPS на сайтах, які це підтримують;

– Smart Referer: підмінює або блокує HTTP referer для захисту приватності;

– AudioContext Fingerprint Defender: спотворює відбитки AudioContext, додаючи випадковий шум;

– ScriptSafe: пропонує додаткові опції антивідстеження, зокрема захист буфера обміну та випадкові затримки між натисканнями клавіш;

– User-agent Switcher: дозволяє замінювати User-agent, зокрема через JavaScript.

Такі налаштування та доповнення сприяють покращенню приватності користувача, блокуванню відстежувальних елементів і забезпеченню анонімності в браузері Firefox.

Головні моменти про доповнення RAS та інтеграцію Tor у Firefox:

1. Доповнення RAS (Random Agent Spoofer):

– Призначення: інструмент для заміни профілю браузера (User-agent та інші параметри) з широкими можливостями;

– Функціонал: заміна роздільної здатності екрану, часового поясу, параметра window.name. Деякі налаштування керують вбудованими параметрами Firefox;

– Недоліки: немає опції Time Zone Spoofing у тестованій версії. Розробка припинена через складнощі міграції на новий стандарт Firefox WebExtension;

– Сумісність: несумісний із версіями Firefox 57 і вище.

2. Інтеграція Tor у Firefox:

– Проект Fusion: ініціатива щодо об'єднання Tor Browser і Firefox в єдиний браузер, який працюватиме в різних режимах;

– Мета: покращити боротьбу з фінгерпринтингом і спростити налаштування для користувачів;

– Проект Tor Uplift: продовження інтеграції функцій Tor у Firefox.

Все це посилить анонімність та конфіденційність користувачів, особливо після інтеграції нових функцій протидії фінгерпринтингу.

Наступні кроки забезпечують надійний захист та ізоляцію від потенційних загроз і витоків даних.

1. Використання віртуальної машини (VM):

– для захисту від витоків та ізоляції браузера використовується Whonix, що складається з двох VM: одна є шлюзом в інтернет, інша виконує основні завдання. Можна підключати до шлюзу будь-яку VM, зокрема Windows;

– Windows 10 обрано для підвищення анонімності, оскільки виглядає звичніше, ніж Linux. З неї видаляються оновлення, що відправляють телеметрію.

2. Анонімізація трафіку через Whonix-Gateway:

– Tor використовується для анонімізації, але факт використання Tor маскується через VPN;

– використання VPN може бути як через комерційний VPN-сервіс, так і через власний сервер на VPS;

– для маскування трафіку застосовується протокол obfs4, який протидіє аналізу DPI.

3. Налаштування VPN-сервера:

– VPN використовує TCP-порт 443 і блокує зовнішні ICMP-запити;

– DNS-запити йдуть через VPN, із серверів OpenNIC, відповідних країні розташування VPS;

– використовується шифрування керуючого каналу та HMAC-аутентифікація.

4. Додаткові заходи безпеки:

– встановлюється програмне забезпечення для шифрування даних, видалення EXIF та безпечного обміну повідомленнями;

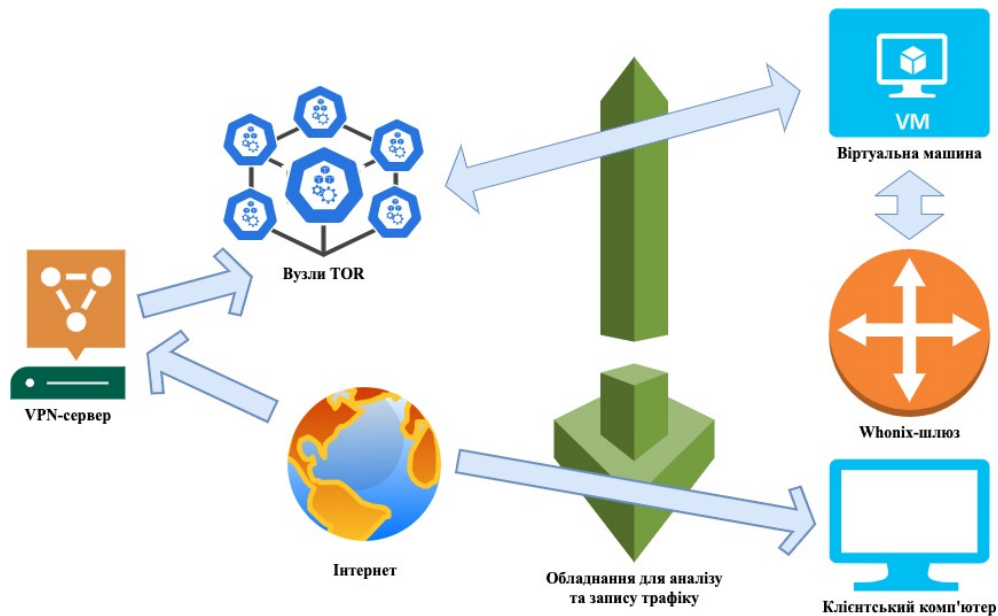


Рис. 1. Основні компоненти системи

Джерело: світлина зроблено авторами

– антивірус необов'язковий, оскільки VM ізольована від реальної системи та IP, а знімки стану VM можуть швидко відновити чисту копію.

Підсумкова схема реалізації наведена на рисунку 1:

– DPI (Deep Packet Inspection): обладнання для аналізу та запису трафіку, яке може включати системи COPM-3, встановлені у провайдера;

– відвідування сайтів: схема дозволяє одночасне відвідування сайтів як із віртуальної машини, так і з основної системи, але розпізнати, що це один і той самий користувач, буде дуже складно;

– обфускація OpenVPN: у даній схемі немає необхідності додатково маскувати OpenVPN, оскільки трафік проходить через Tor з обфускацією;

– захист трафіку: VPN забезпечує захист трафіку від можливого прослуховування на вихідних вузлах мережі Tor.

Така схема забезпечує високий рівень анонімності та захисту даних під час роботи в інтернеті.

Висновки. У ході роботи було проведено глибокий пошук інформації про сучасні методи ідентифікації користувачів та відстеження їхньої активності в Інтернеті. Одним із завдань було зібрати й систематизувати ці дані, що включало аналітичний огляд, проектування та експерименти. Результатом стало створення конфігурації програмного комплексу, який забезпечує високий рівень захисту без погіршення функціональності браузера.

Запропоноване у роботі рішення дозволяє ефективно захищати особисті дані користувача, шифрувати трафік, запобігати витоку IP-адрес та фінгерпринтів, а також забезпечує можливість гнучкого налаштування браузера для максимального рівня анонімності. Використання VPN через Tor гарантує надійну анонімність, навіть при використанні стандартних ОС, таких як Windows.

Таким чином, робота вносить значний вклад у розуміння і вирішення проблем анонімності в Інтернеті, протидії цензурі та боротьби із сучасними системами відстеження, що є надзвичайно актуальним в умовах зростаючого контролю за онлайн-активністю і загроз конфіденційності у цифрову еру.

Список літератури:

1. Karunanayake I., Ahmed N., Malaney R., Islam R., Jha S.K. De-Anonymisation Attacks on Tor: A Survey. *In IEEE Communications Surveys & Tutorials*. Vol. 23. No. 4. P. 2324-2350. 2021. DOI: <https://doi.org/10.1109/COMST.2021.3093615>
2. Alsabah M., Goldberg I. Performance and security improvements for TOR: A survey. *ACM Computing Surveys (CSUR)*. Vol. 49(2). P. 1-36. 2016. DOI: <https://doi.org/10.1145/2946802>
3. Saad Saleh, Junaid Qadir, Muhammad U. Ilyas. Shedding Light on the Dark Corners of the Internet: A Survey of Tor Research. *Journal of Network and Computer Applications*. Vol. 114. 2018. P. 1-28. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jnca.2018.04.002>

4. Cambiaso E., Vaccari I., Patti L., Aiello M. Darknet Security: A Categorization of Attacks to the Tor Network. *In ITASEC*. Vol. 2315. P. 1-12. 2019. URL: <https://ceur-ws.org/Vol-2315/paper10.pdf>
5. Basyoni L., Fetais N., Erbad A., Mohamed A., Guizani M. Traffic Analysis Attacks on Tor: A Survey. *2020 IEEE International Conference on Informatics, IoT, and Enabling Technologies (ICIoT)*. 2020. P. 183-188. DOI: <https://doi.org/10.1109/ICIoT48696.2020.9089497>
6. Nikiforakis N., Joosen W., Livshits B. PriVaricator: Deceiving Fingerprinters with Little White Lies. *In Proceedings of the 24th International Conference on World Wide Web (WWW '15). International World Wide Web Conferences Steering Committee*. P. 820-830. 2015. <https://doi.org/10.1145/2736277.2741090>
7. Cao Y., Li S., Wijmans E. (Cross-)Browser fingerprinting via OS and hardware level features. *In Proceedings 2017 Network and Distributed System Security Symposium. Internet Society*. 2017. URL: https://yinzhaicao.org/TrackingFree/crossbrowsertracking_NDSS17.pdf
8. Englehardt S., Narayanan A. Online Tracking: A 1-million-site Measurement and Analysis. *In Proceedings of the 2016 ACM SIGSAC Conference on Computer and Communications Security (CCS '16). Association for Computing Machinery*. P. 1388-1401. 2016. DOI: <https://doi.org/10.1145/2976749.2978313>
9. Jansen R., Juarez M., Galvez R., Elahi T., Diaz C. Inside Job: Applying Traffic Analysis to Measure Tor from Within. *Network and Distributed System Security Symposium*. 2018. DOI: <https://doi.org/10.14722/ndss.2018.23279>
10. Darir H., Borisov N., Dullerud G. DiProber: Estimating Relays Capacities in Underloaded Anonymous Communication Networks. *2024 American Control Conference (ACC)*. P. 462-467. 2024. DOI: <https://doi.org/10.23919/ACC60939.2024.10644851>
11. Mukhin V., Zavgorodnii V., Kornaga Y., Krysak I., Bazaliy M., Mukhin O. Program Code Protecting Mechanism Based on Obfuscation Tools. In: Zgurovsky, M., Pankratova, N. (eds) *System Analysis & Intelligent Computing. (SAIC). Studies in Computational Intelligence*. Vol. 1022. P. 407-419. 2022. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-030-94910-5_20
12. Mukhin V., Kornaga Y., Bazaliy M., Zavgorodnii V., Krysak I., Mukhin O. Obfuscation Code Technics Based on Neural Networks Mechanism. *IEEE 2nd International Conference on System Analysis & Intelligent Computing (SAIC)*. P. 1-6. 2020. DOI: <https://doi.org/10.1109/SAIC51296.2020.9239247>
13. Chao D., Xu D., Gao F., Zhang C., Zhang W., Zhu L. A Systematic Survey on Security in Anonymity Networks: Vulnerabilities, Attacks, Defenses, and Formalization. *In IEEE Communications Surveys & Tutorials*. Vol. 26. No. 3. P. 1775-1829. 2024. DOI: <https://doi.org/10.1109/COMST.2024.3350006>

Zavgorodnii V.V., Zavgorodnya A.A., Vasiliev S.V., Prusov V.O. DEVELOPMENT OF A METHODOLOGY FOR USER ANONYMITY AND ANTI-TRACKING ONLINE

The work is devoted to the development of a solution to ensure the anonymity of users, in particular those who do not have technical knowledge, but need to hide their identity on the Internet. The source system assumes that the ISP has access to the user's identity, and the workstation (most likely a Windows OS) is used for day-to-day tasks.

A number of key stages were carried out in the work, including the collection and analysis of modern theoretical information, the study of existing analogue solutions, the design of a practical solution and a series of experiments to evaluate its effectiveness. The main goal of the research was to develop a set of software that ensures a high level of anonymity of users on the Internet and protection against various methods of tracking and identification.

The work proposed the use of the "VPN over Tor" scheme for effectively masking user traffic. This configuration allows the VPN address to be issued instead of Tor, making the traffic less suspicious to external systems. Instead of the standard Tor Browser, it is suggested to use a modified Firefox with appropriate settings for anonymity. Chromium browsers are rejected because Firefox has a wider range of privacy settings, such as anti-fingerprinting and the ability to configure private data.

As a result of the work, a software complex was selected, configured and tested, which most effectively solves the tasks. The main functionality of the system includes hiding and changing user data, encrypting and obfuscating traffic, masking the use of anonymizers, isolating the web browser from the main operating system, and protecting against real data leaks.

To strengthen protection, it is suggested to use virtual machines with Windows OS, which provides an additional level of isolation from possible attacks and data leaks. To anonymize traffic through Tor, it is recommended to use Whonix-Gateway with the obfs4 protocol, which provides protection against DPI analysis.

Key words: information security, anonymity, protection from tracking, encryption, Internet.

Зозуля В.А.

Державний торговельно-економічний університет

Осадчий С.І.

Льотна академія Національного авіаційного університету

АЛГОРИТМИ ЗВЕДЕННЯ ОДНОКОНТУРНОЇ БАГАТОВИМІРНОЇ СЛІДКУВАЛЬНОЇ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ ДО ЕКВІВАЛЕНТНИХ СИСТЕМ СТАБІЛІЗАЦІЇ

У статті розглянуто платформи Стюарта, як об'єкт керування. Визначено, що актуальна задача максимізація точності виконання програмного руху робочої поверхні платформи Стюарта, яка потребує вирішення декількох складних задач дослідження динамічних об'єктів. Для істотного спрощення розв'язання задач аналізу і синтезу складних динамічних систем, таких як систем керування рухом робочої поверхні платформи Стюарта в статті пропонується алгоритм приведення структурної схеми багатовимірної слідкувальної системи до структурної схеми багатовимірної системи стабілізації. Розробка такого алгоритму є метою даної роботи. Цей алгоритм побудований на основі загального алгоритму зведення слідкувальних систем до еквівалентних систем стабілізації з урахуванням правил перетворення структурних схем та лінійних систем. Алгоритм розроблено для перетворення багатовимірної одноконтурної слідкувальної системи з корекцією по збуренню чи ні. Визначенні похибки та функціонал критерію якості слідкуючої системи з корекцією по збуренню або без неї. Також зазначено, що важливу роль мають поліноміальні вагові матриці обмеження дисперсії сигналу керування та дисперсії помилки, визначення яких полягає у тому, щоб за відомими особливостями динаміки об'єкта стабілізації та фізичним змістом компонентів векторів його вихідних координат і сигналів керування встановити нормативні значення шуканих матриць та визначити зв'язок між ними. Таким чином результат цієї роботи є розробка методика та алгоритму структурного перетворення схеми багатовимірної слідкувальної системи керування рухом робочої поверхні платформи Стюарта до схеми системи стабілізації для подальшого дослідження синтезу та якості даної системи. Обґрунтована в роботі методика та алгоритм дозволяють в подальшому запропонувати інформаційну технологію аналітичного конструювання оптимальної багатовимірної слідкуючої системи керування рухом РП платформи Стюарта при випадкових впливах, яка включає виконання ряду взаємозалежних операцій.

Ключові слова: слідкувальна система, система стабілізації, функціонал критерію якості, платформа Стюарта.

Постановка проблеми. Особливий інтерес представляє конструкції просторових механізмів з паралельною структурою, які в перші з'явилися в 50-х – 60-х роках ХХ століття в роботах Стюарта і Гауфа [1, 2]. Надалі «платформою Стюарта» стали називати конструкцію, яка має шість однотипних кінематичних ланцюгів (штанг), при цьому програмно регулюючи їх довжину, можна керувати положенням вихідної ланки: переміщати її у вертикальному і горизонтальному напрямках, повертати в трьох площинах. Така платформа, має шість ступенів вільності: три поступальні і три обертальні.

В дослідженні [3], аналізу структурних схем систем керування рухом робочої поверхні (РП) платформи Стюарта при використанні її для вирі-

шення різних видів технологічних завдань: позиціонування, стабілізації, тренажеру рухів мобільних об'єктів та ін. [4] і з урахуванням положень теорії автоматичного керування встановлено, що незалежно від сфери застосування усі системи керування рухом РП платформи Стюарта можуть бути класифіковані як багатовимірні одноконтурні слідкувальні системи з корекцією по збуренню чи ні.

Для складного багатовимірного об'єкта керування, такого як платформа Стюарта, актуальна задача максимізація точності виконання програмного руху. Як відомо з монографії [5], така задача вимагає вирішення цілої низки проблемних питань створення оптимальної системи керування.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Вивчення результатів досліджень, які наведені

у джерелах [5, 6], дозволило визначити концепцію аналітичного конструювання оптимальної системи керування рухом РП платформи Стюарта. Зазначена концепція полягає у приведенні структурної схеми багатовимірної слідкувальної системи до структурної схеми багатовимірної системи стабілізації та подальшого використання технології синтезу, представленої у [7].

В роботі [5] запропоновано загальний алгоритм зведення слідкувальних систем до еквівалентних систем стабілізації з урахуванням правил перетворення структурних схем та лінійних систем [8]. Таке зведення формалізує і істотно спрощує розв'язання задач аналізу і синтезу складних динамічних систем, таких як систем керування рухом РП платформи Стюарта.

Постановка завдання. Метою статті є розробка алгоритму структурного перетворення схеми багатовимірної слідкувальної системи керування рухом РП платформи Стюарта до схеми системи стабілізації для подальшого дослідження синтезу та якості даної системи.

Виклад основного матеріалу. В роботі [9] запропоновано структурна схема одноконтурної багатовимірної слідкувальної системи керування рухом РП платформи Стюарта, як показано на рисунку 1, з відповідними позначення та термінами.

Маємо x_1 – n -мірний вектор вихідних координат об'єкта керування, платформи Стюарта; P_0 – поліноміальна матриця розмірності $n \times n$, яка характеризує динаміку об'єкта керування; u – m -мірний вектор сигналів керування; M_0 – поліноміальна матриця розмірності $n \times m$, яка визна-

чає чутливість об'єкта до зміни сигналів керування; ψ_{ob} – n -мірний вектор стаціонарних випадкових збурень в об'єкті керування з нульовим математичним очікуванням; динаміка частин регулятора, розташованих у ланцюгу завдання програмного сигналу, в зворотному зв'язку до об'єкта та в ланцюзі об'єкта керування, описується матрицями передатних функцій W_2 , W_1 та W_3 які мають розмірності $m \times n$. Будемо вважати також, що вектор вихідних координат x_1 вимірюється повністю за допомогою системи неідеальних датчиків, динаміка яких визначається матрицею передавальних функцій K_1 . На виході вимірників діє n -мірний вектор зосереджених стаціонарних випадкових шумів r_1 . На вхід системи подається n -вимірний вектор програмного сигналу руху r_0 , датчик програмного сигналу описується матрицею передатних функцій K_2 розміром $n \times n$, стаціонарні випадкові шуми програмного сигналу характеризуються n -вимірний вектором φ_r .

У випадку коли виконується корекція по збуренню додається ланцюг коректуючого зв'язку по збуренню, на рисунку 1 позначені штриховими лініями, в якому вектор збурення ψ_{ob} надходить на вимірювач динаміка якого визначається матрицею передавальних функцій L_1 розміром $n \times n$. На виході вимірювач L_1 формується n -вимірний вектор корекції по збуренню програмного сигналу руху y_1 з стаціонарним випадковим шумом φ_L розміром $n \times n$. Вектор корекції по збуренню програмного сигналу руху y_1 надходить до частини регулятора W_0 передаточної функції W_4 , розміром $m \times n$, яка формує керуючий сигнал u_L .

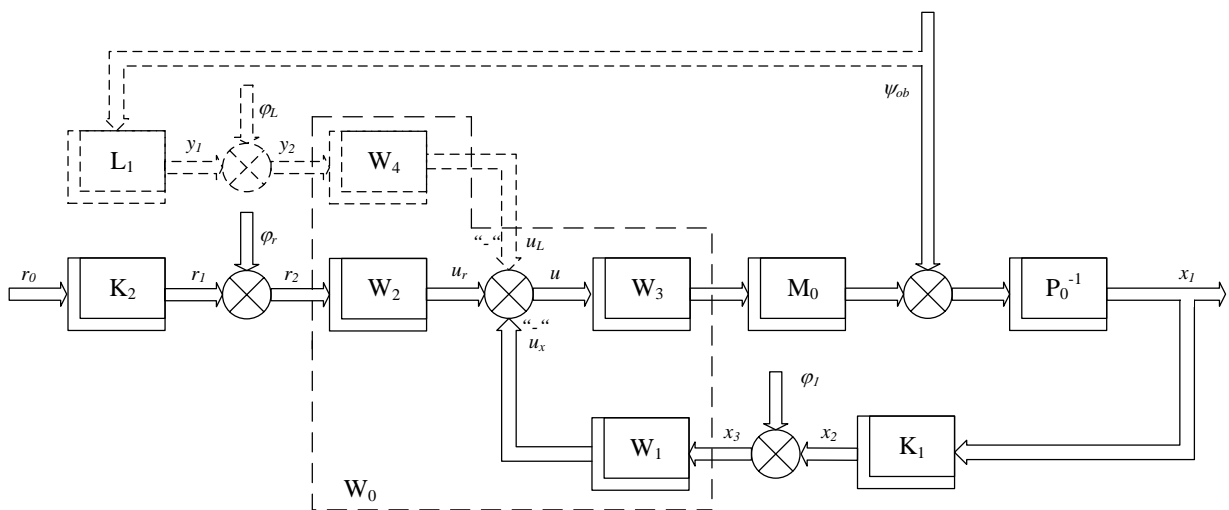


Рис. 1. Структурна схема одноконтурної багатовимірної слідкувальної системи керування

а різниця між програмним сигналом та сигналом вихідних координат об'єкта керування буде похибка слідкуючої системи:

$$\varepsilon = x_1 - \Phi r_0. \quad (10)$$

З врахуванням визначення (3) запишемо рівняння (10) в векторно-матричній формі:

$$\varepsilon = E_n x_1 - \Phi z = [E_n \quad -\Phi] \begin{bmatrix} x_1 \\ z \end{bmatrix}, \quad (11)$$

та значення транспонованої похибки дорівнює:

$$\varepsilon' = [x_1 \quad z] \begin{bmatrix} E_n \\ -\Phi \end{bmatrix}. \quad (12)$$

Тоді на підставі визначення (11), (12) функціонал критерію якості системи стабілізації для одноконтурної слідкуючої системи набуває вигляду

$$e_1 = \langle \varepsilon' R \varepsilon \rangle + \langle u' C u \rangle, \quad (13)$$

де “<>” – знак математичного очікування; “/” – знак транспонування [10]; R – додатно визначена поліноміальна вагова матриця розміру $n \times n$, яка визначає вплив дисперсії помилки на значення критерію e_1 ; C – невід’ємно визначена поліноміальна вагова матриця розміру $m \times m$, яка обмежує дисперсію сигналу керування u . Задача визначення елементів матриць вагових коефіцієнтів R та C , детально викладено в роботах [5], і полягає у тому, щоб за відомими особливостями динаміки об'єкта стабілізації та фізичним змістом компонентів векторів його вихідних координат x і сигналів керування u встановити нормативні значення шуканих матриць R , C та визначити зв'язок між ними та R , C .

Підставивши визначення (5), (11) та (12) в критерій якості (13) отримаємо:

$$e_1 = \langle x_{r0}' (K_0^{-1})' \begin{bmatrix} E_n \\ -\Phi \end{bmatrix} R [E_n \quad -\Phi] (K_0^{-1}) x_{r0} \rangle + \langle u' C u \rangle. \quad (14)$$

З врахуванням визначення (3), (6) та рівняння (5), вираз (14) перетворюється на рівняння

$$e_1 = \langle x_r' R_1 x_r \rangle + \langle u' C u \rangle,$$

де R_1 дорівнює:

$$R_1 = \begin{bmatrix} R & \\ & -\Phi \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_n & -\Phi \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R & -R\Phi \\ -\Phi R & \Phi R \Phi \end{bmatrix}. \quad (15)$$

На відміну від системи стабілізації де R є коефіцієнтом, в слідкуючої системі R_1 дорівнює матриці 2×2 .

У випадку з корекцією по збуренню, ланцюг на рисунку 1 позначено штриховими лініями, система рівнянь (2) доповнюється рівнянням:

$$E_n c = O_n + L_1 \psi_{ob}, \quad (16)$$

де $c = y_j = L_1 \psi_{ob}$.

Тоді запишемо нову систему рівнянь в векторно-матричній формі:

$$\begin{bmatrix} P_0 & O_n & O_n \\ O_n & E_n & O_n \\ O_n & O_n & E_n \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ z \\ c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} M_0 \\ O_{n \times m} \\ O_{n \times m} \end{bmatrix} u + \begin{bmatrix} \psi_{ob} \\ r_0 \\ L_1 \psi_{ob} \end{bmatrix}.$$

Введемо позначення:

$$P_{10} = \begin{bmatrix} P_0 & O_n & O_n \\ O_n & E_n & O_n \\ O_n & O_n & E_n \end{bmatrix}, x_L = \begin{bmatrix} x_1 \\ z \\ c \end{bmatrix}, M_{10} = \begin{bmatrix} M_0 \\ O_{n \times m} \\ O_{n \times m} \end{bmatrix}, \quad (17)$$

$$\psi_L = \begin{bmatrix} \psi_{ob} \\ r_0 \\ L_1 \psi_{ob} \end{bmatrix}$$

де P_{10} – розширена поліноміальна матриця розмірності $n \times n$, яка характеризує динаміку об'єкта керування; x_L – розширений вектор реакцій; M_{10} – розширена поліноміальна матриця розмірності $n \times m$, яка визначає чутливість об'єкта до зміни сигналів керування; ψ_L – розширений вектор стаціонарних випадкових збурень в об'єкті керування.

Враховуючи позначення (17), рівняння (1), можна записати так:

$$P_{10} x_L = M_{10} u + \psi_L. \quad (18)$$

По аналогії з рівнянням (5) можна записати наступне рівняння:

$$\begin{bmatrix} x_2 \\ r_1 \\ y_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} K_1 & O_n & O_n \\ O_n & K_2 & O_n \\ O_n & O_n & L_1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ z \\ c \end{bmatrix}, \quad (19)$$

введемо позначення:

$$x_{L_0} = \begin{bmatrix} x_2 \\ r_1 \\ y_1 \end{bmatrix}, K_{10} = \begin{bmatrix} K_1 & O_n & O_n \\ O_n & K_2 & O_n \\ O_n & O_n & L_1 \end{bmatrix}. \quad (20)$$

Вимірювачі K_1 , K_2 та L_1 мають похибки ϕ_1 , ϕ_r та ϕ_L , що представляють собою багатовимірні випадкові стаціонарні центровані процеси з відомими матрицями спектральних і взаємних спектральних щільностей. По аналогії з рівнянням (7), можна записати наступне рівняння:

$$\begin{bmatrix} x_3 \\ r_2 \\ y_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_2 \\ r_1 \\ y_1 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \phi_1 \\ \phi_r \\ \phi_L \end{bmatrix}, \quad (21)$$

введемо позначення:

$$\phi_{10} = \begin{bmatrix} \phi_1 \\ \phi_r \\ \phi_L \end{bmatrix}. \quad (22)$$

З врахуванням рівняння (19) та позначень (17), (20), (22) отримуємо:

$$\begin{bmatrix} x_3 \\ r_2 \\ y_2 \end{bmatrix} = K_{10}x_L + \phi_{10}.$$

Рівняння сигналу керування u можна визначити, як:

$$u = W_3(-W_1x_3 + W_2r_2 - W_4y_2),$$

а в матричній формі

$$u = W_3 \begin{bmatrix} -W_1 & W_2 & -W_4 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_3 \\ r_2 \\ y_2 \end{bmatrix},$$

де $W_0 = W_3 \begin{bmatrix} -W_1 & W_2 & -W_4 \end{bmatrix}$ – передаточна функція регулятора одноконтурної багатомірної слідкувальної системи керування з корекцією по збуренню.

Тоді маємо

$$u = W_0(K_{10}x_L + \phi_{10}). \quad (23)$$

Таким чином, одноконтурної слідкувальна система з корекцією по збуренню еквівалентна за структурою рівняннями об'єкта (18) та регулятора (23) системі стабілізації, яка зображена на рисунку 2.

Функціонал критерію якості для одноконтурної слідкувальної системи з корекцією по збуренню визначається аналогічно, як для одноконтурної слідкувальної системи. Різниця між програмним сигналом та сигналом вихідних координат об'єкта керування буде похибка слідкувальної системи:

$$\varepsilon = x_L - \Phi r_0. \quad (24)$$

З врахуванням визначення (17) за пишемо рівняння (24) в векторно-матричній формі:

$$\varepsilon = \begin{bmatrix} E_n & -\Phi & O_n \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ z \\ c \end{bmatrix}, \quad (25)$$

та значення транспонованої похибки дорівнює:

$$\varepsilon' = \begin{bmatrix} x_1 & z & c \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_n \\ -\Phi_* \\ O_n \end{bmatrix}, \quad (26)$$

тоді згідно рівняння (13) та (19), визначення (20), (25), (26) можна записати:

$$e_{10} = \left\langle x_{L_0}' (K_{10}^{-1})' \begin{bmatrix} E_n \\ -\Phi_* \\ O_n \end{bmatrix} R \begin{bmatrix} E_n & -\Phi & O_n \end{bmatrix} K_{10}^{-1} x_{L_0} \right\rangle + \langle u' C u \rangle, \quad (27)$$

З врахуванням визначення (17), (20) та рівняння (19), вираз (27) перетворюється на рівняння

$$e_{10} = \langle x_L' R_{10} x_L \rangle + \langle u' C u \rangle,$$

де R_{10} дорівнює:

$$R_{10} = \begin{bmatrix} R \\ -\Phi_* R \\ O_n \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_n & -\Phi & O_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R & -R\Phi & O_n \\ -\Phi_* R & \Phi_* R\Phi & O_n \\ O_n & O_n & O_n \end{bmatrix}.$$

На відміну від системи стабілізації де R є коефіцієнтом, в слідкувальної системі з корекцією по збуренню R_{10} дорівнює матриці 3×3 .

Висновки. Для системи, що розглядаються в даній роботі, складено алгоритми зведення одноконтурних слідкувальних систем до еквівалентних систем стабілізації. Таке зведення формалізує і істотно спрощує розв'язання задач аналізу і синтезу складних динамічних систем, таких як систем керування рухом РП платформи Стюарта. При цьому, на відміну від системи стабілізації де додатно визначена поліноміальна вагова матриця R , яка визначає вплив дисперсії помилки на значення функціоналу критерію якості системи є матриця розмірності $n \times n$, в слідкувальної системі дорівнює матриці розмірності $2n \times 2n$.

Таким чином, розроблено нові алгоритм та процедура, які дозволяють поширити методи вирішення задач дослідження систем стабілізації у частотній області на випадок дослідження оптимальних одноконтурних системи слідкування та системи слідкування з введенням корекції по збуренню.

Обґрунтовані вище методика та алгоритм дозволяють в подальшому запропонувати інформаційну технологію аналітичного конструювання оптимальної багатомірної слідкувальної системи керування рухом РП платформи Стюарта при випадкових впливах, яка включає виконання ряду взаємозалежних операцій.

Список літератури:

1. Stewart D. A platform with 6 degrees of freedom. Proc. of the Institution of mechanical engineers, 180 (Part 1, 15), 1965. P. 371–386.
2. Gough, V.E. and Whitehall, S.G., Universal tyre test machine. Proceedings of the FISITA Ninth International Technical Congress. 1962. May. P. 117–137.
3. Hamid D. Taghirad. Parallel Robots. Mechanics and Control. CRC Press; 1 edition, by Taylor & Francis Group, 2013, 533 p.
4. Merlet J.-P. Parallel Robots. Springer, 2nd edition, 2006. 394 p.

5. Блохін Л.М., Буриченко М.Ю., Білак Н.В., [та ін.]. Статистична динаміка систем управління: підручник. К.: НАУ. 2014. 300 с.
6. Александров Є.Є. Автоматичне керування рухомими об'єктами і технологічними процесами: Навч. посібник: у 4 т. Т. 2: Автоматичне керування рухом літальних апаратів/ Є.Є. Александров, Е.П. Козлов, Б.І. Кузнецов; за заг.ред. Є.Є. Александрова – Харків: НТУ"ХП", 2006. 528 с.
7. Osadchiy S.I., Zozulya V.A. Combined method for the synthesis of optimal stabilization systems of multidimensional moving objects under stationary random impacts. Automation and Information Sciences. 2013. Vol. 45, Issue 6. P. 25–35.
8. Kvakernaak H., Sivan R. Linear optimal control systems. New York: John Wiley & Son Inc., 1972. 575 p.
9. Зозуля В.А., Осадчий С.І. Огляд методів побудови систем керування механізмом паралельної кінематичної структури на основі платформи Стюарта (гексапод). Автоматизація технологічних і бізнес-процесів. 2019. Т.11 № 3. С. 23–31.
10. Horn R. A., Johnson C. R. Matrix Analysis. Cambridge University Press (2nd ed.), 2012. 643 p. DOI: 10.1017/CBO9781139020411.

Zozulia V.A., Osadchiy S.I. ALGORITHMS FOR REDUCING A SINGLE-LOOP MULTIDIMENSIONAL TRACKING CONTROL SYSTEM TO EQUIVALENT STABILIZATION SYSTEMS

The article considers Stewart platforms as a control object. It is determined that the actual task is to maximise the accuracy of the Stewart platform's working surface programmed movement, which requires solving several complex problems of studying dynamic objects. In order to significantly simplify the solution of the problems of analysis and synthesis of complex dynamic systems, such as control systems for the motion of the Stewart platform's working surface, the paper proposes an algorithm for reducing the structural diagram of a multidimensional tracking system to the structural diagram of a multidimensional stabilisation system. The development of such an algorithm is the aim of this paper. This algorithm is based on a general algorithm for reducing tracking systems to equivalent stabilisation systems, taking into account the rules for transforming structural diagrams and linear systems. The algorithm is designed to transform a multidimensional single-loop tracking system with or without disturbance correction. The error and the functionality of the quality criterion for a tracking system with or without perturbation correction are determined. Polynomial weighting matrices are important for limiting the variance of the control signal and the error. Their definition helps establish normative values for the required matrices. It also clarifies the relationship between them based on known characteristics of the dynamics of the stabilization object and the physical meaning of the components of the vectors for its output coordinates and control signals. The result of this work is the development of a methodology and algorithm for transforming the structure of a multidimensional tracking system. This system controls the motion of the working surface of the Stewart platform. The transformation will help in further studying the synthesis and quality of the stabilization system. The methodology and algorithm justified in this work allow us to further propose an information technology for the analytical design of an optimal multidimensional tracking system for controlling the motion of the Stewart platform's working surface under random influences, which includes the performance of a number of interdependent operations.

Key words: tracking system, stabilization system, quality criterion functionality, Stewart platform.

Іванишин В.В.

Національний університет харчових технологій

Мошенский А.О.

Таврійський національний університет імені В.І. Вернадського

КОНЦЕПЦІЯ АВТОМАТИЗОВАНОЇ СИСТЕМИ МОНІТОРИНГУ ПАСІКИ НА ОСНОВІ ТЕХНОЛОГІЇ LORA З ВИКОРИСТАННЯМ СЕНСОРІВ РЕАЛЬНОГО ЧАСУ

У сучасному світі бджільництво стає все більш залежним від нових технологій для підвищення продуктивності пасік та забезпечення ефективного управління бджолосім'ями. Однією з ключових проблем є необхідність своєчасного моніторингу стану вуликів для запобігання роїнню, захворювань бджіл та інших факторам, що можуть призвести до втрати бджолосімей. Система моніторингу на базі технології LoRa та контролера ESP32 пропонує економічне рішення для віддаленого контролю стану вуликів у реальному часі з використанням бездротових сенсорних мереж.

Основними перевагами системи є низьке енергоспоживання, великий радіус дії (до 15 км) і можливість автономної роботи завдяки використанню сонячних панелей і акумуляторів. Це робить систему ідеальною для використання у віддалених районах або на великих пасіках. Система включає сенсори для вимірювання температури, вологості, ваги та акустики у вуликах. Зібрані дані передаються через мережу LoRa на базову станцію, де зберігаються на хмарному сервері, і доступні для аналізу через веб-інтерфейс або мобільний додаток.

Система моніторингу бджолосімей на основі ESP32 та LoRa є однією з найекономічніших та ефективних систем серед існуючих на ринку. Вартість впровадження для одного вулика варіюється від \$36 до \$85, а для базової станції – від \$70 до \$150, що робить її доступною навіть для невеликих пасік. Крім того, низькі витрати на обслуговування (приблизно \$10–\$20 на рік) забезпечують швидку окупність інвестицій протягом 1–2 років.

В статті наводяться порівняльні характеристики аналогічних систем та бездротових технологій. Запропонована концепція та структурна схема автоматизованої системи. Особлива увага приділяється енергозбереженню контролера ESP32, тому запропоновано використання режиму глибокого сну, що дозволяє контролеру працювати кілька місяців без необхідності перезарядки.

Розроблена концепція може бути використана як основа для подальших досліджень та удосконалень у сфері автоматизації бджільництва, а також слугувати базою для масштабованих IoT-рішень у галузі сільського господарства. Реалізація і застосування запропонованої системи дозволить значно підвищити ефективність управління пасіками, зменшити ризики втрат і поліпшити якість розвитку бджолосімей та надасть ефект від запилу ентомофільних культур.

Ключові слова: бджільництво, моніторинг бджолосімей, LoRa, ESP32, бездротові сенсорні мережі, автоматизація пасіки, інтернет речей (IoT), енергозбереження, сенсори температури, сенсори ваги, сонячні панелі, автономна система, віддалений моніторинг, хмарні сервіси, пасіка, апарії.

Постановка проблеми. Бджільництво є однією з ключових галузей сільського господарства, яка забезпечує виробництво не тільки меду та інших цінних продуктів (прополіс, маточне молочко, бджолина отрута), але й виступає критично важливою складовою для запилення ентомофільних культур. У зв'язку зі зниженням кількості бджолосімей та скороченням виробництва, постала нагальна потреба у впровадженні інноваційних рішень для управління пасіками та контролю стану бджіл [15].

Однією з найбільших проблем сучасного бджільництва є значні витрати часу та ресур-

сів на моніторинг та обслуговування бджолосімей. У більшості випадків це потребує постійної фізичної присутності пасічника, що ускладнює управління великими пасіками та знижує ефективність виробництва. Традиційні методи ведення бджільництва часто не враховують сучасні технології, які здатні полегшити цей процес і зробити його більш продуктивним [12].

З цією метою було розроблено та впроваджено низку автоматизованих систем моніторингу стану бджолиних сімей [2–3, 5–8]. Однак, більшість існуючих систем мають обмеження, такі як висока

вартість, недостатня адаптація до місцевих умов та обмежений функціонал. Це зумовлює потребу в розробці нової системи, яка б враховувала особливості українського ринку і була доступною для малих та середніх пасік.

Ця робота спрямована на розробку та обґрунтування концепції нової системи моніторингу бджолосімей, заснованої на сучасних бездротових технологіях і здатної забезпечити ефективний контроль за станом вуликів у реальному часі. Особливу увагу буде приділено використанню технологій LoRa та IoT, що забезпечують віддалений доступ до даних і дозволяють оптимізувати витрати енергії.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. На сучасному етапі розвитку технологій для бджільництва існує багато різноманітних систем моніторингу стану бджолосімей [2–3, 5–8, 10, 14, 16]. Однак, більшість з них поки що не набули широкого розповсюдження і знаходяться на етапі тестування або вдосконалення. Нижче наведено порівняльний аналіз найбільш популярних систем, що використовуються в бджільництві на сьогоднішній день.

Основні недоліки наведених систем:

1. BroodMinder – обмежений радіус дії через використання технології Bluetooth.
2. Arnia – висока вартість і залежність від GSM мереж, що ускладнює використання у віддалених регіонах.
3. HiveTool – відсутність інтеграції з іншими сенсорами чи системами моніторингу.
4. ApisProtect – висока ціна та складність налаштувань для малих пасік.
5. BuzzBox – підтримує лише базові сенсори, такі як температура та вага.

6. BeeCheck – Основним недоліком є обмежена функціональність для великих пасік, де необхідно більше комплексних даних.

7. VIBee – не підтримує інші параметри, крім вібрації, що обмежує можливості аналізу.

8. Bee-Ring – система є дорогою, і підтримка додаткових сенсорів обмежена.

Постановка завдання. Сучасні системи моніторингу бджолосімей, які наведені вище та інші, зазвичай мають високу вартість і використовують енергоємні технології передачі даних (GSM, Wi-Fi), що обмежує їх використання у віддалених місцевостях або на великих пасіках. Ці системи також можуть залежати від доступу до мобільних мереж, що не завжди є можливим у сільській місцевості. Тож метою розробки концепції є створення нової автоматизованої системи моніторингу бджолосімей у вигляді доступного, енергоефективного та масштабованого рішення для віддаленого контролю стану вуликів, яке забезпечить пасічникам можливість моніторингу ключових параметрів без постійної фізичної присутності на пасіці з можливістю автоматизованої обробки даних та надання рекомендації по проведенню необхідних робіт.

Виклад основного матеріалу. Наразі вже існують системи, які дозволяють здійснювати моніторинг бджолосімей за допомогою бездротових сенсорів, що передають дані у режимі реального часу. Проте багато з них мають обмежений функціонал або є занадто дорогими для масового використання. У даному дослідженні пропонується концепція інноваційної системи моніторингу, яка використовує сучасні технології бездротової передачі даних, зокрема LoRa, що забезпечує низьке енергоспоживання, широкий радіус дії та можливість роботи у віддалених місцевостях.

Таблиця 1

Порівняння систем моніторингу бджолосімей

№	Система	Вартість (USD)	Функціональність	Технологія передачі даних	Країна походження	Особливості
1	BroodMinder	\$199–\$499	Основні параметри	Bluetooth	США	Простий монтаж
2	Arnia	\$400–\$1000	Розширений аналіз	GSM/IoT	Велика Британія	Моніторинг у реальному часі
3	HiveTool	\$250–\$600	Температура, вага	Інтернет	США	Аналіз метеоумов
4	ApisProtect	\$300–\$800	AI, оповіщення	IoT	Ірландія	Інтеграція з штучним інтелектом
5	BuzzBox	\$150–\$450	Температура, вага	GSM/IoT	США	Аналіз акустики
6	BeeSecure	\$50–\$100	Захист від крадіжок	GSM, GPS	Німеччина	Датчики руху
7	VIBee	\$200–\$600	Вібраційний аналіз	GSM, Wi-Fi	Швейцарія	Моніторинг вібрації для аналізу активності бджіл
8	Bee-Ring	\$250–\$700	Температура, вага, звук	IoT	Франція	Розширений аналіз активності бджіл

Порівняння бездротових технологій передавання даних

Технологія	Рік виникнення	Діапазон дії	Енергоспоживання	Швидкість передачі даних	Орієнтовна вартість впровадження (USD)	Придатність для бджільництва
LoRa	2015	До 15 км	Низьке	0.3–50 Кбіт/с	\$30–\$150	Висока
NB-IoT	2016	До 10 км	Низьке	26–250 Кбіт/с	\$1000–\$1500	Середня
GSM/4G	1991 (GSM), 2009 (4G)	Широке покриття	Високе	До 100 Мбіт/с	\$800–\$2000	Низька
ZigBee	1998	До 100 м	Низьке	До 250 Кбіт/с	\$150–\$300	Низька
Wi-Fi	1997	До 100 м	Високе	До 600 Мбіт/с	\$500–\$1000	Низька

З огляду на поставлену проблему пропонується, взявши з основу загальні принципи побудови аналогів, створити нову автоматизовану систему з трьома основними перевагами:

1. **Використання технології LoRa** – (Long Range) є сучасною бездротовою технологією, яка дозволяє передавати дані на великі відстані (до 10–15 км) при мінімальних витратах енергії. У порівнянні з іншими технологіями передачі даних (Bluetooth, Wi-Fi або GSM), LoRa забезпечує кращу дальність і енергоефективність, що робить її ідеальним вибором для віддалених або великих пасік [1, 4, 9]. Основні параметри сучасних бездротових технологій наведені у Таблиці 2.

2. **Висока енергоефективність.** Використання контролера ESP32 з підтримкою режиму глибокого

сну значно знижує енергоспоживання системи. Контролер може споживати лише кілька мікроампер під час сну і пробуджуватися лише для збору та передачі даних, що забезпечує роботу системи від сонячних панелей або батарей протягом кількох місяців (до півроку) без необхідності обслуговування [11, 17, 18, 19].

3. **Низька вартість.** Нова система розроблена на основі модульної архітектури та з використанням стандартних сенсорів, які мають широке поширення і низьку вартість. Такий підхід дозволить пасікам при розширенні значно зменшити вартість впровадження автоматизованої системи.

Структурно-функціональна схема пропонованої системи наведена на рисунку 1:

Технологічні особливості: Запропонована система моніторингу стану бджолосімей базується

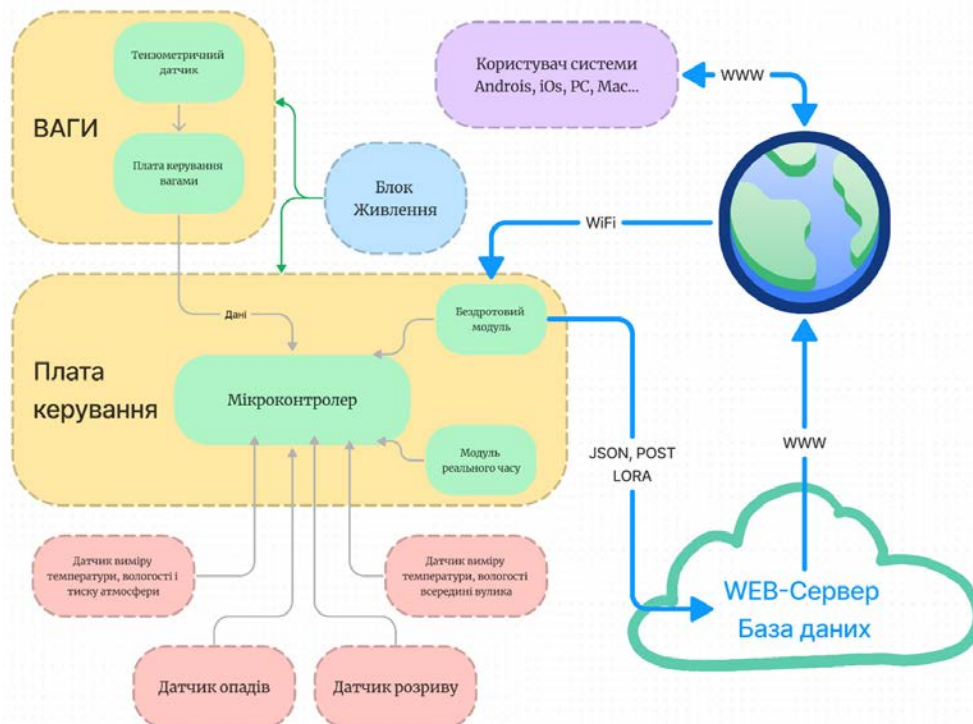


Рис. 1. Структурно-функціональна схема автоматизованої системи моніторингу стану бджолосімей

на інтеграції LoRa як основної технології передачі даних. Система включає набір сенсорів, які вимірюють температуру, вологість, вагу вуликів та акустичні параметри бджіл. Дані збираються у режимі реального часу і передаються на центральний сервер через мережу LoRa.

Ключовими компонентами системи є:

1. Сенсори температури і вологості: встановлені всередині та зовні вулика для контролю мікроклімату.

2. Вагові сенсори які дозволяють моніторити вагу вулика для відстеження медозбору та споживання кормів.

3. Акустичні сенсори: записують звуки вулика для аналізу активності бджіл та виявлення критичних ситуацій, таких як відсутність матки або роїння.

4. LoRa-модуль: забезпечує передачу даних з сенсорів на сервер на великі відстані з мінімальним споживанням енергії.

5. Модуль живлення: включає сонячні панелі та батареї для забезпечення тривалої автономної роботи системи.

Оптимізація коду для контролера ESP32 в режимі глибокого сну: У системах моніторингу бджолосімей важливо забезпечити тривалу автономну роботу, мінімізуючи енергоспоживання. Одним із найефективніших способів досягти цього є використання режиму глибокого сну (deep sleep) у контролерах ESP32 [18, 19]. Цей режим дозволяє значно знизити енергоспоживання, оскільки всі непотрібні компоненти, такі як Wi-Fi і процесор, вимикаються, а контролер споживає лише кілька мікроампер енергії.

Для підвищення енергоефективності системи моніторингу можна впровадити кілька додаткових оптимізацій. Окрім таймера пробудження, ESP32 також підтримує пробудження від різних апаратних подій, таких як сигнал від сенсорів або зовнішніх кнопок. Це дозволяє використовувати контролер у більш складних сценаріях і знижувати енергоспоживання.

У деяких випадках, особливо при моніторингу стану вуликів, важливо, щоб система могла миттєво реагувати на критичні події (наприклад, різкі зміни температури або ваги). Для цього можна налаштувати пробудження ESP32 за допомогою сигналу від зовнішніх сенсорів через GPIO-піни.

Висновки. Нове рішення з використанням технології LoRa є ідеальним для системи моніторингу бджолосімей завдяки своїм численним перевагам. Воно дозволяє передавати дані на

дуже великі відстані, до 10–15 км, що надзвичайно корисно для великих або віддалених пасік. Завдяки низькому енергоспоживанню система може працювати автономно протягом тривалого часу, використовуючи лише батареї або сонячні панелі, що значно знижує потребу в технічному обслуговуванні. Крім того, LoRa має високу стійкість до перешкод, що забезпечує надійну передачу даних навіть у складних умовах. Система легко масштабується і дозволяє однією базовою станцією обслуговувати велику кількість вуликів, що знижує загальні витрати на впровадження. Оскільки LoRa-модулі є відносно недорогими, система моніторингу на базі цієї технології економічно вигідна та доступна для різних типів пасік.

Вперше запропоновано використати для системи моніторингу пасіки оптимізацію контролера ESP32 для роботи в режимі глибокого сну, що дозволяє значно знизити енергоспоживання і забезпечити тривалу автономну роботу автоматизованої системи моніторингу бджолосімей. Використання сенсорів для вимірювання температури, вологості, ваги та інших параметрів вулика у поєднанні з LoRa-модулем для передачі даних забезпечило надійну і точну систему контролю. Перевага цього рішення полягає в його здатності працювати у віддалених місцях без постійного підключення до електромережі, що робить його ідеальним для застосування у великих або віддалених пасіках.

пробудження від таймерів та зовнішніх подій (наприклад, від сенсорів), а також швидкому переходу в режим глибокого сну, ESP32 мінімізує витрати енергії і продовжує термін служби системи. Нове рішення забезпечує високу енергоефективність без втрати якості або точності збору даних.

Нова система відзначається доступною вартістю компонентів, що робить її привабливою для широкого кола бджолярів. Її впровадження значно спрощує процес моніторингу пасіки, що позитивно позначається на підвищенні якості та кількості бджолосімей. Це, в свою чергу, сприяє ефективнішому запиленню ентомофільних культур, що матиме вагомий вплив на розвиток сільськогосподарського сектору України.

Тож можна вважати доцільним подальшу розробку концепції автоматизованої системи моніторингу пасіки на основі технології LoRa з використанням сенсорів реального часу з огляду на її перспективність і економічну привабливість для реалізації в реальному секторі економіки.

Список літератури:

1. Al-Rakhami, M., Almowuena, S. *Wireless Sensor Networks Security: State of the Art*, 2018.
2. ApisProtect. URL: <https://apisprotect.com/> (дата звернення: 13.09.2024).
3. Arnia Remote Hive Monitoring. URL: <http://www.arnia.co.uk/> (дата звернення: 13.09.2024).
4. Ayoub, W., Bennis, M., Nashashibi, F. *Internet of Mobile Things: Overview of LoRaWAN, DASH7, and NB-IoT in LPWANs Standards and Supported Mobility // IEEE Communications Surveys and Tutorials*. 2019.
5. BeeCheck. URL: <https://beecheck.org/> (дата звернення: 13.09.2024).
6. BeeRing. URL: <https://www.bee-ring.com/> (дата звернення: 13.09.2024).
7. Broodminer. URL: <https://broodminder.com/> (дата звернення: 13.09.2024).
8. BuzzBox. URL: <https://www.osbeehives.com/> (дата звернення: 13.09.2024).
9. Debauche, O., Moulat, M.E., Mahmoudi, S., Boukraa, S., Manneback, P., Lebeau, F. *Web Monitoring of Bee Health for Researchers and Beekeepers Based on the Internet of Things*. *Procedia Comput. Sci.*, 2018.
10. HiveTool.Net. URL: <http://hivetool.net/> (дата звернення: 13.09.2024).
11. Marco Schwartz. *Internet of Things with ESP8266, Paperback – July 29, 2016*.
12. Мікла І. А., Кісь В. М. Система контролю стану бджолоїної сім'ї // *Матеріали МНПК «Інноваційні розробки в аграрній сфері», ХНТУСГ, ННІ МСМ. 12–13 грудня 2019 року.* – С. 122–123.
13. OSBeehives | BuzzBox Hive Health Monitor & Beekeeping App. URL: <https://www.osbeehives.com> (дата звернення: 13.09.2024).
14. VIBee. URL: <https://vibee-project.net/en/start-english/> (дата звернення: 13.09.2024).
15. Winston, M. *The biology of the honey bee*. London, England: First Harvard University Press, 1991.
16. 3Bee. URL: <https://www.3bee.com/en/technology/> (дата звернення: 13.09.2024).
17. Луїс Лламас. *Енергоспоживання ESP32*. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.luisllamas.es/en/esp32-power-consumption/> – Дата доступу: 13 вересня 2023 року.
18. Програмування ESP32 для режиму глибокого сну // *Circuit Digest* [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://circuitdigest.com/microcontroller-projects/esp32-active-mode-and-deep-sleep-mode-power-consumption> – Дата доступу: 13 вересня 2023 року.
19. Посібник зі зниження споживання енергії ESP32 на 95% // *DIYIoT* [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://diyiot.com/reduce-the-esp32-power-consumption/> – Дата доступу: 13 вересня 2023 року.

Ivanyshyn V.V., Moshensky A.O. THE CONCEPT OF AN AUTOMATED APIARY MONITORING SYSTEM BASED ON LORA TECHNOLOGY USING REAL-TIME SENSORS

In today's world, beekeeping is becoming increasingly dependent on new technologies to increase apiary productivity and ensure effective bee colony management. One of the key issues is the need for timely monitoring of the condition of hives to prevent swarming, bee diseases and other factors that can lead to the loss of bee colonies. The monitoring system based on LoRa technology and the ESP32 controller offers a cost-effective solution for remote real-time monitoring of hives using wireless sensor networks.

The main advantages of the system are low power consumption, long range (up to 15 km) and the possibility of autonomous operation due to the use of solar panels and batteries. This makes the system ideal for use in remote areas or large apiaries. The system includes sensors to measure temperature, humidity, weight and acoustics in the hives. The collected data is transmitted via a LoRa network to the base station, where it is stored on a cloud server and available for analysis via a web interface or mobile app.

The ESP32 and LoRa-based bee colony monitoring system is one of the most cost-effective and efficient systems on the market. The cost of implementation for a single hive varies from \$36 to \$85, and for a base station – from \$70 to \$150, making it affordable even for small apiaries. In addition, low maintenance costs (approximately \$10–\$20 per year) ensure a quick return on investment within 1–2 years.

The article provides comparative characteristics of similar systems and wireless technologies. The concept and block diagram of the automated system are proposed. Particular attention is paid to energy saving of the ESP32 controller, so it is proposed to use the deep sleep mode, which allows the controller to operate for several months without the need for recharging.

The developed concept can be used as a basis for further research and improvements in the field of beekeeping automation, as well as serve as a basis for scalable IoT solutions in the field of agriculture. The implementation and application of the proposed system will significantly increase the efficiency of apiary management, reduce the risk of losses and improve the quality of bee colony development, and will have an effect on the pollination of entomophilic crops.

Key words: *beekeeping, bee colony monitoring, LoRa, ESP32, wireless sensor networks, apiary automation, Internet of Things (IoT), energy efficiency, temperature sensors, weight sensors, solar panels, autonomous system, remote monitoring, cloud services, apiary.*

Карпенко М.І.

Національний університет харчових технологій

Чумаченко С.М.

Апарат Ради національної безпеки і оборони України

Мошенський А.О.

Національний університет харчових технологій

Гуйда О.Г.

Таврійський національний університет імені В.І. Вернадського

АРГУМЕНТАЦІЯ ЕФЕКТИВНОСТІ АЛЬТЕРНАТИВНИХ ЗАСОБІВ МОНІТОРИНГУ НА ПРИКЛАДІ MESHTASTIC ТА APRS

Моніторинг стану води, повітря та ґрунтів в Україні активно здійснюється з ХХ століття. Система моніторингу включає як державні, так і громадські ініціативи, які покривають широкий спектр методів і технологій. Спостереження проводяться як вручну, так і автоматично, зокрема за допомогою WiFi для передачі даних з постів спостереження. Використання WiFi значно підвищує ефективність системи моніторингу завдяки швидкості отримання та передачі інформації про стан екологічних показників. Однак цей підхід має свої обмеження, зокрема відсутність можливості передавання даних у реальному часі за межами зони покриття WiFi. Це особливо стосується віддалених територій, таких як ліси, гори або поля, де мобільний зв'язок також може бути обмеженим або відсутнім. Для вирішення цієї проблеми все більшого поширення набуває використання радіо модулів, які застосовують інші протоколи зв'язку. Такі модулі мають низьке енергоспоживання, здатні створювати мережі та обмінюватися даними між пристроями навіть на великій відстані. Це дає можливість забезпечити безперебійний моніторинг у віддалених регіонах та під час надзвичайних ситуацій, зокрема в умовах блекаутів, коли традиційні засоби зв'язку стають недоступними. Радіо модулі не потребують WiFi-покриття, що робить їх надзвичайно ефективними під час аварійних ситуацій, оскільки інформація передається автоматично в межах радіусу дії. Такі технології, як MESHTASTIC та APRS, вже сформували спільноти користувачів, які активно використовують ці системи для передачі та відображення даних. Завдяки спеціалізованим додаткам, дані можна зручно переглядати на популярних пристроях, таких як смартфони на базі Android, ПК та ноутбуки з операційними системами iOS, Windows і Mac. Це значно спрощує процес підключення до мереж та доступу до екологічної інформації. У статті розглядаються аргументи на користь використання технологій MESHTASTIC та APRS, а також демонструються практичні приклади застосування цих систем. Описуються можливості підключення пристроїв до мережі та способи налаштування моніторингового обладнання для забезпечення зручного та ефективного моніторингу довкілля, незалежно від умов та наявності традиційних каналів зв'язку.

Ключові слова: MESTASTIC, APRS, радіо модуль, IoT, моніторинг, mesh, мережа.

Постановка проблеми. Повномасштабне вторгнення російської федерації наклало на життя громадян України величезні втрати та поневіряння, які не можна компенсувати нічим. Стаття має на меті показати як вирішити ту малу технічну низку обмежень, спричинених війною. Окупанти неодноразово обстрілювали ЗАЕС, застосовують заборонені бойові отруйні речовини (БОР) проти ЗСУ, підривали Каховську ГЕС та влучають снарядами в місця зберігання хімічних речовин і заводи. Наслідки таких застосувань далекобій-

ного озброєння відображаються в довгостроковій перспективі на всьому навколишньому середовищі, зокрема на цивільному населенні.

Держава витратила чимало коштів на системи оповіщення та моніторингу екологічної ситуації. Екологічний моніторинг покладений на різні державні установи та їх дочірні підприємства. Окрім цього, свій внесок роблять громадські організації, які ведуть моніторинг менш організовано і не завжди точно (державні організації мають виконувати моніторинг, керуючись нормами та

нормативами, які прописані на законодавчому рівні, що не можна сказати про аматорські станції спостереження), але їхня перевага в економності компонентів (зазвичай аматорські пристрої більш дешеві, ніж точні апарати державного замовлення) та частоті вимірів (в основному більшість станцій моніторингу цивільних спілок надсилають дані з низькою затримкою, що стосується також і частини державних пунктів спостереження).

Державні та громадські організації впроваджують рішення на основі IoT. Станції спостереження на основі IoT передають дані в реальному часі, мають великий термін життя батарей та збирають інформацію дистанційно, що дозволяє не залучати людей до моніторингу та, відповідно, не наражати їхнє здоров'я на небезпеку (моніторинг небезпечних ділянок). Втім, громадські та державні проекти покладаються на WiFi як основний канал передачі даних, що викликає певні обмеження: неможливість моніторингу поза зоною WiFi, низької швидкості інтернет-з'єднання у віддалених від ретранслятора регіонах, високої вартості розгортання та підтримки мережі, а також високого енергоспоживання. Всі ці обмеження можуть бути вирішені за рахунок використання радіо модулів.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. У праці Patmasari та ін. [1] показано ефективність APRS як альтернативний спосіб зв'язку. Зазвичай APRS використовується в процесі моніторингу, але в статті була проведена робота зі створення станції для обміну повідомленнями з наносупутником та їх відображенням на різних пристроях з використанням програмного забезпечення AGWPE для демодуляції сигналу AFSK і UI-View32 для показу даних телеметрії. Стаття Hajdarevic та ін. [2] представляє недорогу клієнт-серверну інфраструктуру APRS з використанням Raspberry Pi, APRSdroid і програмно визначеного радіо (SDR). Робота Lee та ін. [3] демонструє порівняння APRS та LoRa технологій для використання в IoT, де LoRa виявляється кращим вибором у контексті smart farm. У статті Asri та ін. [4] показується ефективність застосування APRS на прикладі імітованої евакуації від цунамі. Праця Una та ін. [5] також присвячена застосуванню APRS під час природнього лиха з метою збереження зв'язку між людьми за відсутності мобільного зв'язку та Інтернет з'єднання. Стаття Suryadevara та ін. [6] присвячена практичній реалізації передачі даних через meshtastic мережу через веб-інтерфейс для теми IoT програми. У дипломній роботі Коорманн [7] порівнює

мережі Koopatracker, Meshtastic і Altus Metrum, відзначивши простоту налаштування Meshtastic. Cass у статті [8] відзначає популярність мережі. Del Solar та ін. у своїй роботі [9] показують можливості сітчастих мереж LoRa, зокрема надаючи як приклад Meshtastic. Freitag та ін. у статті [10] показують ефективність mesh-мереж та зручність Meshtastic для користувачів в районах з поганим або відсутнім Інтернет покриттям.

Методологія. Було проведено експериментальне дослідження, в ході якого була зібрана та проаналізована інформація з різних літературних джерел та досліджень. Першим кроком до досягнення мети дослідження був збір апаратної складової станції моніторингу APRS. Наступним було її налаштування, позиціонування та відображення даних з сенсора, що включало налаштування сенсора, опанування програми UI-view32 та Aprsdroid. Подальші дії з Meshtastic проходили схожим чином: збір компонентів апаратної складової, налаштування пристроїв, підключення до мережі Meshtastic, прошивка плат через застосунок на Android та через Web API.

Постановка завдання. Основною задачею статті є показати можливості радіо модулів та мереж на основі низькочастотних радіо хвиль (MESHTASTIC та APRS), показати їхні переваги та недоліки. Дослідити особливості мереж шляхом створення власних станцій моніторингу та під'єднавши їх до MESHTASTIC та APRS.

Виклад основного матеріалу. APRS – це не просто протокол зв'язку, а маловідома мережа з обмеженим розповсюдженням, що зумовлене кількома факторами. Перший фактор – складність використання, яка виявляється лише для пересічного користувача, який навряд чи розглядатиме можливість передачі даних на застарілій частоті. Сучасні смартфони давно витіснили радіостанції, проте саме це й надає APRS унікальних властивостей. Другий фактор – відсутність очевидної потреби: для пересічного громадянина ідея побудови метеостанції або використання APRS для зв'язку навряд чи буде актуальною. Варто зазначити, що для взаємодії з громадянською мережею APRS не обов'язково використовувати радіостанцію; існують численні можливості інтеграції, такі як TTN, LORA тощо. APRS є дуже зручним вибором для використання її як альтернативу Інтернет-мережі, оскільки APRS інтегрувалась як в мікроконтролери, так і в смартфони та ПК. Більше того, можна використовувати APRS разом з Інтернет з'єднанням. Для мобільних телефонів доступне програмне забезпечення APRSdroid,

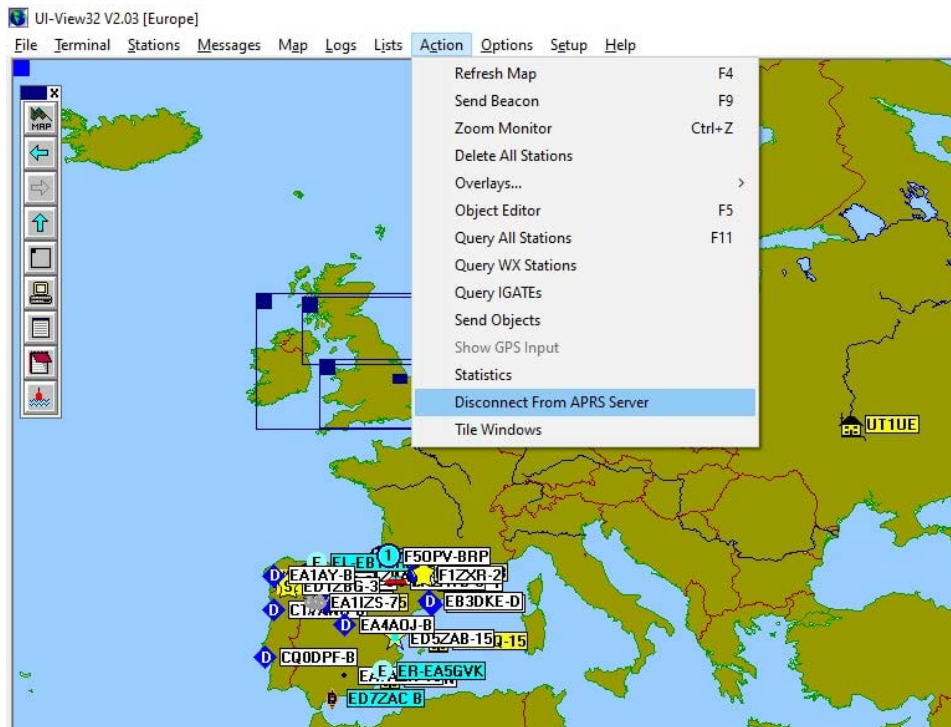


Рис. 1. Відображення станції UT1UEST на UI-view32 [11]

яке можна придбати в Google Play Market або завантажити безкоштовно з офіційного сайту розробника. Іншою можливістю є використання персонального комп'ютера. Наразі існують лише два програмні інструменти для взаємодії з APRS через ПК: UI-View32 та QAPRS.

Для створення станції було використано NodeMCU1 Esp8266 та датчик Bmp280, а також позивний університету НУХТ UT4UYF та зареєстрований власноруч UT1UEST. Окрім роботи у застосунку UI-view32 було продемонстровано роботу станції на платформі Android та на сайті aprs.fi [11].

Meshtastic – це відкритий протокол зв'язку, що використовує технологію мережевого об'єднання (mesh network) для забезпечення передачі даних у віддалених місцевостях або в умовах відсутності інфраструктури зв'язку. На відміну від радіооперацій НАМ, без необхідності отримання додаткових ліцензій чи сертифікатів. Ці радіостанції призначені для ретрансляції отриманих повідомлень, утворюючи сітчасту мережу. Це налаштування гарантує, що кожен член групи, включно з тими, хто перебуває на найвіддаленішій відстані, може отримувати повідомлення. Радіостанції Meshtastic можуть бути пов'язані з одним телефоном, що дозволяє друзям і родині надсилати повідомлення безпосередньо на вашу конкретну радіостанцію. Важливо зазначити, що кожен пристрій здатен

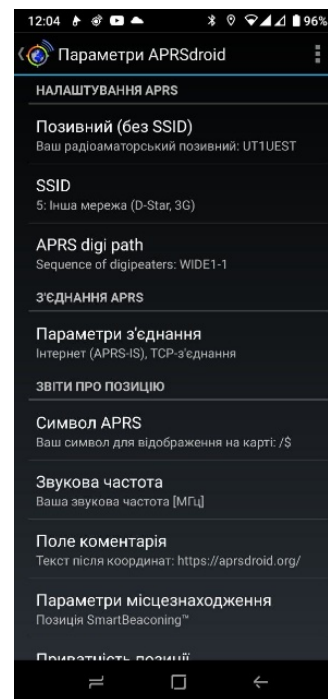


Рис. 2. Відображення станції UT1UEST на AprsDroid [11]

підтримувати одночасно з'єднання лише з одним користувачем. Окрім того, Meshtastic – це проект з відкритим кодом, доступний на GitHub.

Meshtastic працює на різних частотах 433,868,915MHz. Meshtastic забезпечує шифру-

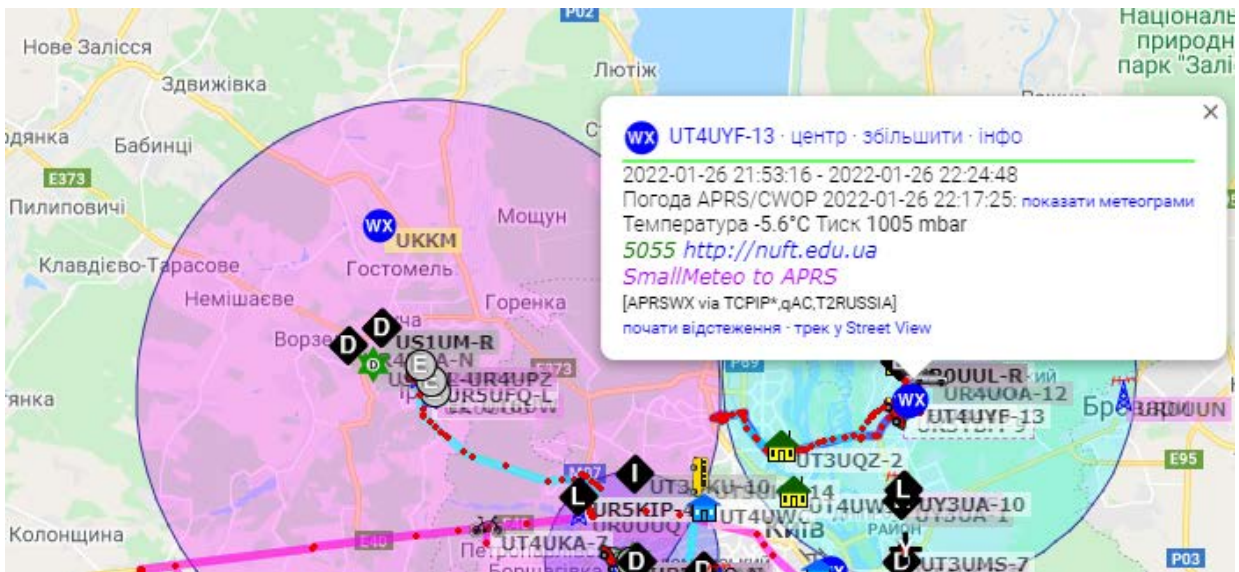


Рис. 3. Відображення станції UT4UYF на платформі aprs.fi [11]

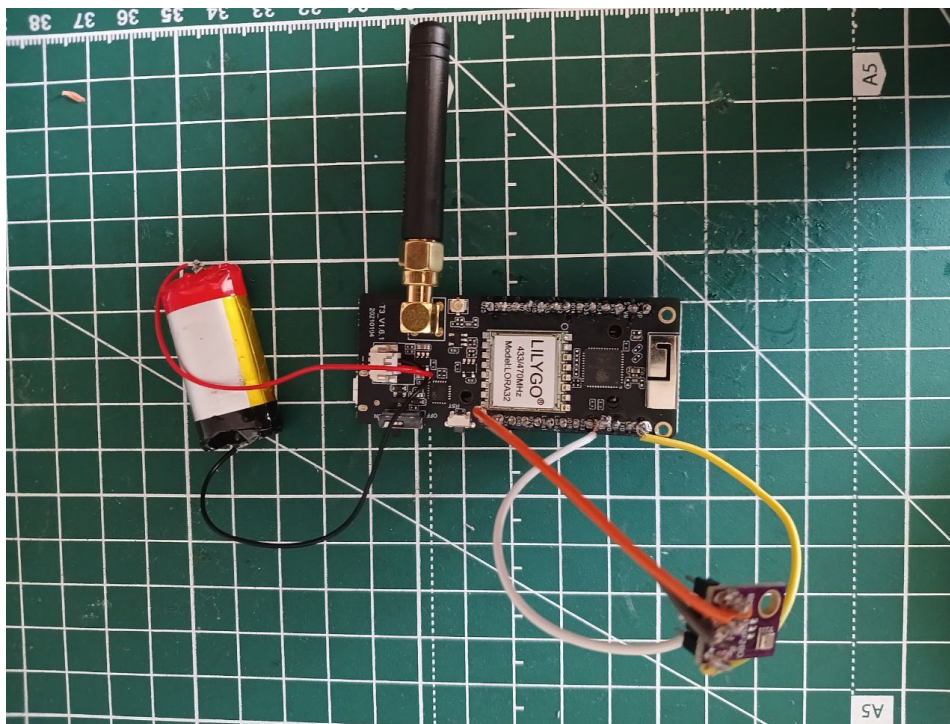


Рис. 4. Комплектація станції

вання AES256-CTR для корисного навантаження кожного пакета під час надсилання через LoRa з окремим ключем для кожного каналу. Заголовок пакету завжди надсилається незашифрованим, що дозволяє вузлам ретранслювати пакети, які вони не можуть розшифрувати. Усі періодичні трансляції (положення, телеметрія тощо), які надсилає сам пристрій, надсилаються через основний канал і таким чином шифруються цим ключем. Пристрій розшифрує корисне навантаження перед тим, як надсилати його клієнтській програмі через

BLE, послідовний порт, Wi-Fi/Ethernet. Наземні тести дальності показують рекордні 254 км [12]. Окрім того, Meshtastic має велику спільноту і було створено низку громадських проектів, щоб відповідати потребам різних людей, наприклад: Meshtasticator (Simulator) – Meshtasticator – це інтерактивний симулятор із дискретними подіями, який імітує радіорозділ програмного забезпечення пристрою. Meshtastic Web API – Meshtastic Web API надає інтерфейс RESTful для взаємодії з вузлом Meshtastic через послідовне з'єднання.



Рис. 5. Результат отримання погодних даних

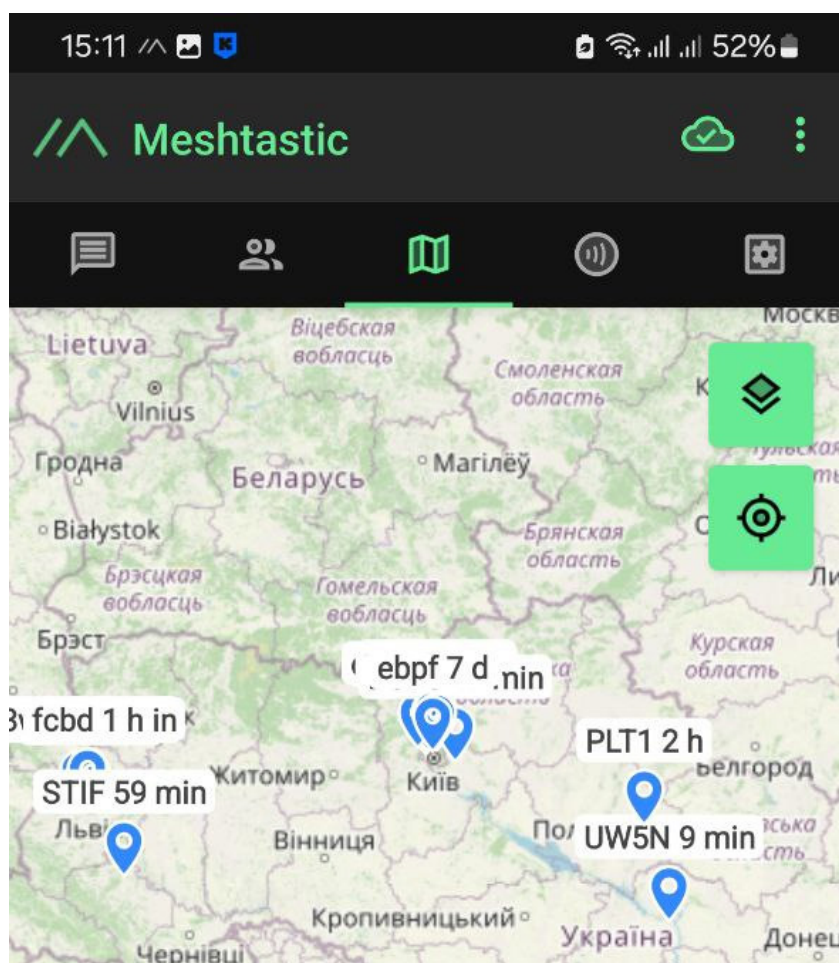


Рис. 6. Вигляд Meshtastic Android

Mesh-metrics – скребок метрик повторювача Meshtastic, який використовує meshtastic-cli, щоб отримати його node_exporter для використання в базі даних часових рядів Metrics Prometheus або Victoria з інформаційною панеллю Grafana та зразками правил попередження. Node-RED Messages Node – вузол Node-RED для надсилання та отримання пакетів / текстових повідомлень від пристрою, підключеного через HTTP.

Велика перевага Meshtastic у підтримці сенсорів (BMP085, BMP180, BMP280, BME280, BME680, MCP9808, INA260, INA219, INA3221, LPS22, SHTC3, SHT31, PMSA003I, PMSA003I, DFROBOT_LARK), які підключені до шини I2C пристрою, будуть автоматично виявлені під час запуску [12].

Для реалізації станції було обрано модуль LoRa32 V2.1_1.6 433MHz та сенсор Bme280. Meshtastic має зручний додаток на Android, як було вказано вище. Для тестів було прийнято рішення використовувати саме зв'язок з телефоном через Bluetooth. Результати роботи та комплектації можна побачити на рис. 4, 5, 6. Оскільки Meshtastic не передбачає обов'язкового використання позивного та надає можливість зміни назви пристрою, було використано довільні назви станцій.

Висновки. У ході дослідження було успішно вирішено завдання підключення моніторингових станцій до мереж Meshtastic та APRS, що продемонструвало ефективність використання низько-частотних радіо модулів у контексті екологічного моніторингу. Розроблені пристрої забезпечують надійну передачу даних в реальному часі, незалежно від покриття WiFi, та функціонують на значних відстанях із низьким енергоспоживанням. Впровадження даного підходу дозволяє усунути недоліки традиційних методів передачі даних, таких як залежність від інфраструктури WiFi, обмеження в покритті та високе енергоспоживання. Використання радіо модулів Meshtastic та APRS підвищує доступність та точність моніторингу, особливо у віддалених та важкодоступних регіонах, що є критично важливим в умовах поточної військової ситуації. Отримані результати підтверджують, що обрана методологія ефективно задовольняє потреби населення в екологічній інформації та підтримує сталість роботи моніторингових систем навіть під час екстремальних умов, таких як блекаут. Мета дослідження досягнута, а запропоноване рішення показало свою практичну цінність та технічну доцільність для подальшого розвитку систем екологічного моніторингу в Україні.

Список літератури:

1. Design and Realization of Automatic Packet Reporting System (APRS) for Sending Telemetry Data in Nano Satellite Communication System. R. Patmasari et al. *Journal of Measurements, Electronics, Communications, and Systems*. 2018. Vol. 4, no. 1. P. 1. URL: <https://doi.org/10.25124/jmecs.v4i1.1692> (date of access: 15.10.2024).
2. Hajdarevic K., Konjicija S., Abdulhamit S. A Low Energy APRS-IS Client-Server Infrastructure Implementation using Raspberry Pi. *Conference: 22nd Telecommunications Forum (TELFOR)*. 2014. P. 296–299. URL: <https://doi.org/10.1109/TELFOR.2014.7034409>.
3. Feasibility of networking technology for smart farm: LoRa vs APRS. H. Lee et al. *2020 International Conference on Omni-layer Intelligent Systems (COINS)*. P. 1–6. URL: <https://doi.org/10.1109/COINS49042.2020.9191428>.
4. Dual Mitigation System: Database System Combination of EWS and APRS for Disaster Management (Case Study: Malang Southern Coast). A. K. Asri et al. *Procedia - Social and Behavioral Sciences*. 2016. Vol. 227. P. 435–441. URL: <https://doi.org/10.1016/j.sbspro.2016.06.098> (date of access: 15.10.2024).
5. Communication Back-up for Natural Disaster by Emergency Amateur Radio Operator and Implemented using APRS as Location Tracker / S. O. UN et al. *The ESSD 2022 Conference*. 2022. P. 87–92. URL: https://www.researchgate.net/profile/Channareth-Srun/publication/366894210_Communication_Back-up_for_Natural_Disaster_by_Emergency_Amateur_Radio_Operator_and_Implemented_using_APRS_as_Location_Tracker/links/63b6f12fa03100368a565d1b/Communication-Back-up-for-Natural-Disaster-by-Emergency-Amateur-Radio-Operator-and-Implemented-using-APRS-as-Location-Tracker.pdf.
6. Suryadevara N., Dutta A. Meshtastic Infrastructure-less Networks for Reliable Data Transmission to Augment Internet of Things Applications. *Wireless and Satellite Systems*. 2022. P. 622–640. URL: https://doi.org/10.1007/978-3-030-93398-2_55.
7. Koopmann B. Koopatracker Development and Performance Comparative Study : A thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements for the Degree of Master of Science In the field of Electrical and Computer Engineering. Southern Illinois, 2023. 81 p. URL: <https://www.proquest.com/openview/b00e1b224d03c1be9fcc52746660bb2c/1?pq-origsite=gscholar&cb=18750&diss=y>.
8. Cass S. It's Meshtastic! > LoRa-based Tech Brings Mesh Radio to Makers. *IEEE Spectrum*. 2024. Vol. 61, no. 6. P. 16–18. URL: <https://doi.org/10.1109/mspec.2024.10551793> (date of access: 15.10.2024).

9. Del Solar A. J. C., Solé J. M., Freitag F. Towards a Monitoring System for a LoRa Mesh Network. *2022 IEEE 42nd International Conference on Distributed Computing Systems (ICDCS)*. 2022. P. 1294–1295. URL: <https://doi.org/10.1109/ICDCS54860.2022.00139>.

10. Freitag F., Miquel Solé J., Meseguer Pallarès R. LoRa mesh networks for enabling distributed intelligence on tiny IoT nodes. *Workshop Proceedings of the 19th International Conference on Intelligent Environments (IE2023) : International Conference*, 27–30 June 2023. 2023. P. 165–170. URL: <https://doi.org/10.3233/AISE230026>.

11. Карпенко, М. І. (2022). Розробка інформаційної системи моніторингу параметрів навколишнього середовища в зоні впливу потенційно-небезпечних об'єктів на Сході України. Національний університет харчових технологій. Київ, Україна.

12. Range Tests. *meshtastic.org*. URL: <https://meshtastic.org/docs/overview/range-tests/> (date of access: 25.08.2024).

Karpenko M.I., Chumachenko S.M., Moshenskyi A.O., Guida O.H. ARGUMENTATION OF THE EFFICIENCY OF ALTERNATIVE MONITORING MEANS USING MESHTASTIC AND APRS

Since the 20th century, Ukraine has been conducting monitoring of water, air, and soil. This monitoring is carried out through observation posts, both manually and automatically. There are state monitoring systems as well as public ones, each of which uses WiFi to some extent for data transmission. This method significantly improves the efficiency of monitoring by speeding up the delivery of information about the state of the environment. However, it also has its drawbacks, such as the inability to transmit real-time data outside the WiFi coverage area, particularly in remote areas like forests, mountains, or fields.

This problem is solved by using radio modules that rely on different communication protocols, have low energy consumption, and are capable of forming networks. These modules, along with the communities and tools that display monitoring data, offer a viable solution. Moreover, the use of radio modules fully meets the population's need for information during blackouts since radio does not require WiFi coverage, is energy-efficient, and data is transmitted automatically within the module's range. Additionally, the MESHTASTIC and APRS communities have developed tools for easy connection and convenient data display via apps compatible with widely-used devices such as smartphones (Android), PCs, and laptops (iOS, Windows, MAC). This article argues for the use of MESHTASTIC and APRS technologies and demonstrates methods and tools for their application using connected, configured devices within these networks. By adopting these technologies, it becomes possible to ensure continuous monitoring, even in remote or blackout-affected regions, providing crucial environmental data to both governmental and public monitoring initiatives.

Key words: MESHTASTIC, APRS, radio module, IoT, monitoring, mesh, network.

Короленко Я.Р.

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

Павловська Ю.О.

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

МОДЕЛЮВАННЯ РУХУ КРОКУЮЧОГО РОБОТА З НЕСПРАВНОЮ КІНЦІВКОЮ В СЕРЕДОВИЩІ MATLAB

Стаття присвячена побудові математичної моделі та моделювання руху крокуючого робота гексапода. В роботі був проведений огляд літературних джерел який виявив значну кількість робіт що присвячені даній тематиці. Існуючі дослідження показали, що для реального застосування запропонованих методичних та алгоритмічних розробок потрібен системний підхід, який дозволить сформулювати адаптивний алгоритм керування рухом гексапода в невизначених умовах. Для реалізації такого алгоритму необхідно було створити математичну модель, яка буде враховувати особливості руху гексапода в умовах несправності/відмови однієї з кінцівок, дослідити кінематику руху гексапода, обрати алгоритми його стійкої ходи, промодельовати та дослідити його переміщення при пошкодженні або втраті кінцівки.

Для цього в статті були вирішені пряма й обернена задачі кінематики, що дозволили розрахувати координати точок контакту кінцівок із поверхнею руху та кути повороту базових суглобів гексапода для імплементації в алгоритм керування.

Всі розрахунки були проведені в середовищі MATLAB, що дозволило реалізувати поетапні розрахунки і візуалізацію скелетного вигляду гексаподу. Для більшої мобільності було обрано симетричну конструкцію корпусу у вигляді правильного шестикутника з розташованими на його вершинах кінцівками. Такий підхід дозволяє спростити розрахунки та збільшити кути повороту кінцівок в горизонтальній площині. Для переміщення гексапода обрано трипедальну ходу, для якої сформовано алгоритм переміщення та розраховано опорні точки у фазах опори та переносу. Запропоновано та обгрунтовано модифікацію алгоритму ходи при несправності/пошкодженні однієї з кінцівок, за умови збереження статичної стійкості робота при русі. Представлена візуалізація гексапода та результати моделювання руху крокуючого робота за запропонованим алгоритмом дають можливість оцінити зміни траєкторії руху робота при пошкодженні однієї з кінцівок, що може бути використано для відновлення чи корекції заданої траєкторії руху з мінімальними втратами часу.

Ключові слова: моделювання, робот, гексапод, математична модель, центр мас, кінематика, пошкодження кінцівки, невизначені умови, MATLAB.

Постановка проблеми. На сьогоднішній день серед великого різноманіття конструкцій крокуючих роботів, найбільш розповсюдженими є роботи з шістьма кінцівками або гексаподи [1, 2]. Такі роботи мають численні переваги порівняно з іншими видами крокуючих платформ, серед них [3]:

- здатність легко утримувати рівновагу під час руху (мають статичну стійкість);
- висока прохідність та мобільність (можливість адаптуватися до різних нерівних поверхонь);
- завдяки відносно великій кількості опорних кінцівок, гексаподи можуть продовжувати виконання місії навіть у випадку втрати однієї або декількох кінцівок;

– здатність переміщуватись в будь-якому напрямку і менше залежати від умов оточуючого середовища, ніж роботи на колесах.

Ці особливості роблять їх ідеальними для виконання завдань, які вимагають певного рівня автономності та високої надійності в умовах руху місцевістю зі складним рельєфом поверхні.

Недоліками роботів гексаподів є надлишкова складність конструкції і поява додаткових ризиків, що пов'язані з відмовами керуючих та виконавчих елементів під час руху, особливо при русі на складних ділянках та з перешкодами. Більша кількість актуаторів призводить до збільшеного споживання енергії і, відповідно, до збільшення маси та габаритних розмірів самого робота. Крім

того, для гексаподів характерним є ускладнення алгоритму керування рухом кінцівок у порівнянні, наприклад, із роботом з чотирма кінцівками. Окремо слід виділити проблему експлуатаційного пошкодження кінцівок, що виникає через пошкодження/втрату елементів конструкції або відмову/руйнування суглобів [4]. Все це обумовило значний науково-практичний інтерес до проблем вдосконалення гексаподів та систем керування для забезпечення їх надійного та стійкого руху в різних умовах функціонування.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Серед існуючих досліджень доцільно виділити напрямки, пов'язані з математичним описом та моделюванням крокуючих роботів, алгоритмами ходи, алгоритмами керування, поведінкою роботів та можливістю забезпечення їх стійкого руху в умовах невизначеності.

В статті [5] наведено детальний аналіз методів побудови кінематичних та динамічних моделей мобільних крокуючих роботів з використанням моделі Денавіта-Хартенберга. На думку авторів такий підхід обумовлює необхідність великої кількості арифметичних та тригонометричних операцій для опису переміщення однієї кінцівки крокуючого робота. Використання такої моделі для опису переміщення усіх кінцівок стає багатоетапним та трудомістким процесом. Автори запропонували альтернативний підхід на основі використання методів проективної геометрії, зокрема, графічного методу трикутників, що передбачає побудову кінцевої множини відповідних трикутників для кожного зчленування кінцівки крокуючого робота. Такий метод виглядає простішим та потребує меншої кількості обчислень, але він не є придатним для моделювання крокуючих роботів в умовах структурної та параметричної невизначеності, а також при нестационарних збуреннях середовища експлуатації об'єкта.

У існуючих прототипах крокуючих платформ багато уваги приділяють алгоритмам ходи та керуванням положенням самої платформи. В роботі [6] розроблено алгоритм повороту крокуючого робота на основі матриці стану кінцівок, що дає можливість за необхідності легко змінювати тип ходи. Запропоновано введення буферної матриці стану, яка дозволяє запам'ятовувати останнє положення кінцівок робота у випадку появи несправності, після ліквідації якої гексапод має можливість продовжити рух із довільного останнього стану, або повернутися у початкове положення та змінити маршрут.

В роботі [7] представлено підхід до розробки та керування реконфігурованими крокуючими

роботами. Описано механічну структуру, основні кінематичні та динамічні залежності кінцівок робота. Систему керування розроблено у вигляді багаторівневого блоку на мікроконтролерах AVR Atmega8/16, які відповідають за формування траєкторії руху і водночас за керування всіма сервоприводами. Представлено розроблені різні алгоритми ходи та правила поведінки, включаючи рух вперед/назад, обхід перешкод, які забезпечують автономну роботу робота або дистанційне керування оператором. Крім того, під час руху алгоритми можуть з'являти тип установок і ходу з навколишнім середовищем.

При зміні зовнішніх факторів і ландшафту, по якому рухається робот, виникає необхідність розробки принципово нових адаптивних алгоритмів керування, до яких відноситься і метод навчання з підкріпленням (Reinforcement learning або RL), який висвітлено у роботі [8], проте даний метод розглядався лише для колісних роботів.

В роботі [9] продемонстрована можливість крокуючого робота продовжувати рух при частковому пошкодженні кінцівок і після цього поновлювати до 96% своєї початкової швидкості. Застосування таких алгоритмів, безумовно, дуже ефективне, коли робот знаходиться в місцях, недоступних для його оперативного ремонту, на великих відстанях від бази, тощо, проте адаптація займає деякий час і потребує як додаткових обчислювальних потужностей, так і додаткових сенсорів для виявлення позаштатних ситуацій.

Проведений аналіз літературних джерел показав значний науковий та практичний інтерес до створення та вдосконалення крокуючих мобільних роботів. Проте недостатньо дослідженими є питання моделювання руху гексапода при структурній невизначеності, наприклад, при пошкодженнях кінцівок, які впливають на його рух або навіть унеможливають його. Через це постає необхідність розробки таких систем керування гексаподом, які б забезпечували можливість стійкого руху у разі непрацездатності чи втрати однієї з кінцівок.

Постановка завдання. Існуючі дослідження показали, що для реального застосування запропонованих методичних та алгоритмічних розробок потрібен системний підхід, який дозволить сформулювати адаптивний алгоритм керування рухом гексапода в невизначених умовах. Для реалізації такого алгоритму необхідно створити математичну модель, яка буде враховувати особливості руху гексапода в умовах несправності/відмови однієї з кінцівок, дослідити кінематику

руху гексапода, обрати алгоритми його стійкої ходи, промоделювати та дослідити його переміщення при пошкодженні або втраті кінцівки.

Викладення основного матеріалу. Розглянемо конструкцію гексаподу тіло якого має форму правильного шестикутника, вписаного у коло радіусом R_0 , а кінцівки розташовані на вершинах шестикутника і складаються з трьох суглобів, які з'єднані трьома ланками. Така конструкція тіла забезпечує можливість руху у довільному напрямі та миттєвої зміни напрямку руху, а зазначена кількість ланок кожної кінцівки забезпечує стійкість та можливість переступати через відносно великі перешкоди. Схематичне зображення обраної конструкції, створене у середовищі MATLAB, наведено на рис. 1.

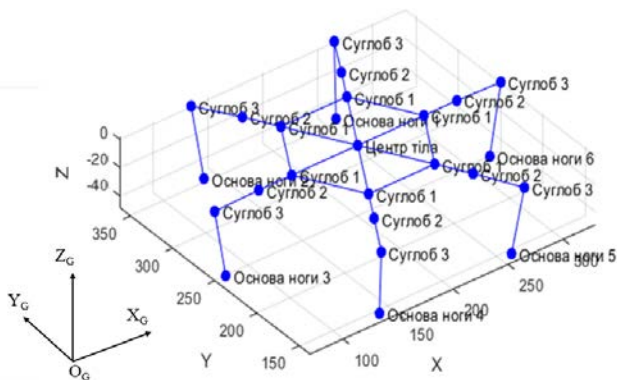


Рис. 1. Зображення обраної моделі гексаподу

Суглоб 1 кожної кінцівки обертається в площині тіла гексапода, а розташування цих суглобів на вершинах шестикутника забезпечує їм більший кут повороту. Суглоби 2 та 3 обертаються в площині, перпендикулярній площині тіла. Симетрична структура тіла дозволяє спростувати моделювання і проводити його лише для однієї кінцівки.

Розглянемо географічну систему координат $O_G X_G Y_G Z_G$, а з тілом гексапода пов'яжемо систему координат $OXYZ$, у точці O початку якої розмістимо геометричний центр тіла. Координати центру тіла у тривимірному просторі позначимо через O_x, O_y, O_z . Для побудови тіла гексаподу визначимо координати B_{xi}, B_{yi}, B_{zi} ($i=1,6$) шести точок, в яких знаходяться вершини правильного шестикутника:

$$\begin{aligned} B_{xi} &= R_0 \cdot \cos(\varphi_i) + O_x \\ B_{yi} &= R_0 \cdot \sin(\varphi_i) + O_y, \\ B_{zi} &= O_z \end{aligned} \quad (1)$$

де O_x, O_y, O_z – координати центру тіла; φ_i – кут нахилу прямої, проведеної від центру тіла до i -тої вершини шестикутника, до осі абсцис; R_0 – радіус кола, в яке вписано шестикутник, відстань від центра тіла до i -тої вершини.

Розглянемо пряму задачу кінематики, згідно з якою за умови заданих кутів обертання суглобів та відомих довжинах ланок кінцівки визначимо координати суглобів та координату точки контакту кінцівки з поверхнею руху, використовуючи наведену в [3, 10] модель кінцівки.

Як показано на рис. 1, кожна кінцівка моделі гексаподу складається з трьох суглобів і трьох ланок довжиною l_1, l_2 , та l_3 . Суглоб 1 приєднаний до тіла гексаподу і забезпечує поворот кінцівки навколо вертикальної осі Z на кут α . Позначимо кути поворотів Суглобу 2 та Суглобу 3 навколо горизонтальних осей (в площині, перпендикулярній тілу гексаподу) відповідно β та γ . Координати i -тої вершини тіла (1) є координатами відповідного Суглобу 1. Суглоб 2 позначимо точкою C з координатами у тривимірному просторі C_{xi}, C_{yi}, C_{zi} , які з урахуванням повороту кінцівки Суглобом 1 навколо вертикальної осі на кут α та кута φ_i визначаємо за виразами:

$$\begin{aligned} C_{xi} &= B_{xi} + l_1 \cdot \cos(\varphi_i - \alpha) & C_{yi} &= B_{yi} + l_1 \cdot \sin(\varphi_i - \alpha) \\ C_{zi} &= B_{zi} \end{aligned} \quad (2)$$

а з урахуванням виразів (1):

$$\begin{aligned} C_{xi} &= R_0 \cdot \cos(\varphi_i) + O_x + l_1 \cdot \cos(\varphi_i - \alpha) \\ C_{yi} &= R_0 \cdot \sin(\varphi_i) + O_y + l_1 \cdot \sin(\varphi_i - \alpha) & C_{zi} &= O_z \end{aligned} \quad (3)$$

Схематично це показано на рис. 2.

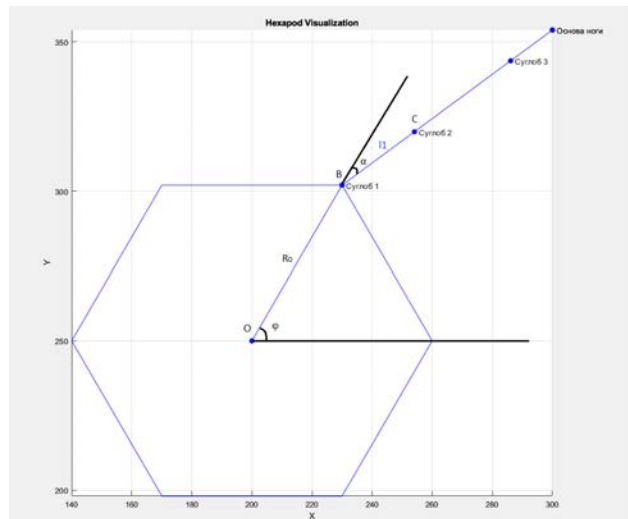


Рис. 2. Схематичне зображення гексаподу з однією кінцівкою для визначення координат Суглобу 2

Суглоб 3 позначимо точкою D з координатами D_{xi}, D_{yi}, D_{zi} , які за відомими координатами точки C та кутом β нахилу ланки l_2 відносно площини, в якій знаходиться тіло гексаподу, визначаємо за виразами:

$$D_{xi} = C_{xi} + l_2 \cdot \cos(\beta) \cdot \cos(\varphi_i - \alpha)$$

$$D_{yi} = C_{yi} + l_2 \cdot \cos(\beta) \cdot \sin(\varphi_i - \alpha) \quad D_{zi} = C_{zi} + l_2 \cdot \sin(\beta),$$

а з урахуванням (3) отримаємо:

$$D_{xi} = R_0 \cdot \cos(\varphi_i) + O_x + l_1 \cdot \cos(\varphi_i - \alpha) + l_2 \cdot \cos(\beta) \cdot \cos(\varphi_i - \alpha)$$

$$D_{yi} = R_0 \cdot \sin(\varphi_i) + O_y + l_1 \cdot \sin(\varphi_i - \alpha) + l_2 \cdot \cos(\beta) \cdot \sin(\varphi_i - \alpha)$$

$$D_{zi} = O_z + l_2 \cdot \sin(\beta). \quad (4)$$

Точку контакту основи кінцівки з поверхнею позначимо E, і відповідно до схематичного зображення на рис. 3 гексаподу з однією кінцівкою у площині, яка перпендикулярна тілу гексаподу і проходить через всі три суглоби і ланки, запишемо вирази для визначення координати точки контакту кінцівки з поверхнею руху:

$$E_{xi} = R_0 \cdot \cos(\varphi_i) + O_x + l_1 \cdot \cos(\varphi_i - \alpha) + l_2 \cdot \cos(\beta) \cdot \cos(\varphi_i - \alpha) + l_3 \cdot \cos(\beta + \gamma)$$

$$E_{yi} = R_0 \cdot \sin(\varphi_i) + O_y + l_1 \cdot \sin(\varphi_i - \alpha) + l_2 \cdot \cos(\beta) \cdot \sin(\varphi_i - \alpha) + l_3 \cdot \cos(\beta + \gamma)$$

$$E_{zi} = O_z + l_2 \cdot \sin(\beta) + l_3 \cdot \sin(\beta + \gamma). \quad (5)$$

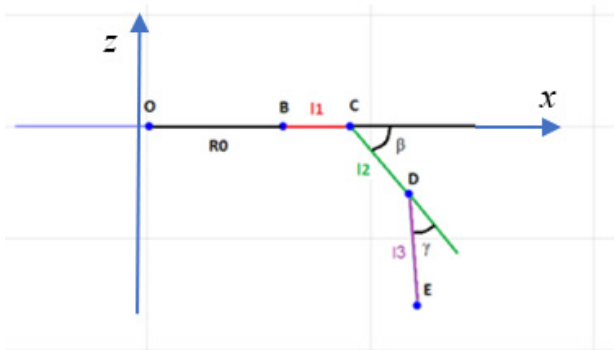


Рис. 3. Схематичне зображення гексаподу з однією ногою у площині, яка перпендикулярна тілу гексаподу і проходить через всі три суглоби і ланки

Розглянемо задачу зворотної кінематики [10, 11], тобто визначимо кути α , β та γ при відомих координатах опорних точок кінцівок гексапода. Нехай координати основи і-тої кінцівки визначені як (E_{xi}, E_{yi}) , а кут повороту навколо осі Z визначається як $(\varphi_i - \alpha)$. Кут $(\varphi_i - \alpha)$ обчислюється як арктангенс відношення різниці координат Суглобу 1 та основи кінцівки за віссю Y до різниці їх координат за віссю X:

$$\varphi_i - \alpha = \arctan(a_i / b_i) \quad a_i = E_{yi} - B_{yi}$$

$$b_i = E_{xi} - B_{xi} \quad (6)$$

З рівнянь (6) визначаємо кут α :

$$\alpha = \varphi_i - \arctan(E_{yi} - B_{yi} / E_{xi} - B_{xi}). \quad (7)$$

Для визначення кутів β та γ розглянемо площину, яка перпендикулярна тілу гексаподу і проходить

через два суглоби (Суглоб 2, точка C і Суглоб 3, точка D), дві ланки l_2 і l_3 та основу кінцівки з точкою E її контакту з поверхнею руху (рис. 4).

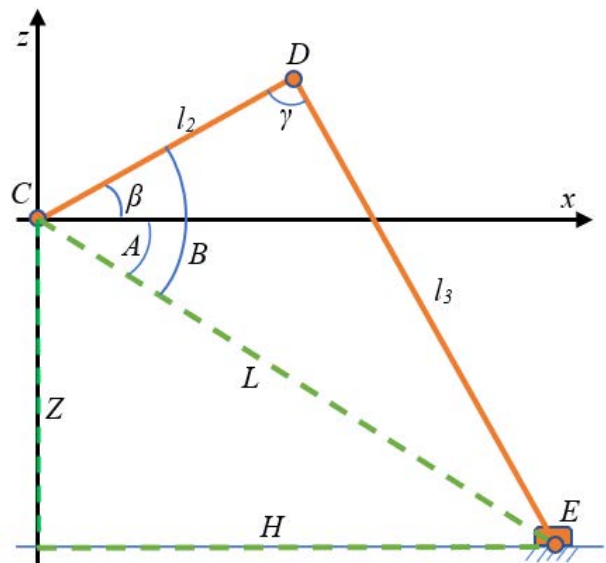


Рис. 4. Графічна схема для розрахунку кутів β та γ

Тоді з наведеної графічної схеми визначимо:

$$H = \sqrt{(E_x - C_x)^2 + (E_y - C_y)^2}; \quad (8)$$

$$L = \sqrt{H^2 + (E_z - C_z)^2}; \quad (9)$$

$$\gamma = \arccos\left(\frac{l_2^2 + l_3^2 - L^2}{2 \cdot l_2 \cdot l_3}\right) \quad (10)$$

$$B = \arccos\left(\frac{L^2 + l_2^2 - l_3^2}{2 \cdot L \cdot l_2}\right); \quad (11)$$

$$A = \arctan(Z / H); \quad (12)$$

$$\beta = B - A. \quad (13)$$

Як результат, при подачі на вхід комплексу кінематичних рівнянь (7)–(13) бажаного положення кінцівки гексаподу ми отримуємо кути, на які необхідно повернути суглоби для переміщення основи кінцівки в бажане положення.

Оскільки конструкція симетрична, то наведені кінематичні рівняння будуть актуальними для будь-якої кінцівки гексапода і будуть відрізнятися лише станом, в якому буде знаходитися кожна кінцівка в певний момент часу. Більш детально розрахунки скелетних точок гексапода (координат та кутів повороту) висвітлено в роботі [10].

Цикл руху кінцівки, що складається з підйому і фіксації в певному стійкому положенні, включає дві фази: фазу переносу (переміщення кінцівки в повітрі з початкового в кінцеве положення) та фазу опори (основа кінцівки контактує з поверхнею руху) [12].

Стійкість крокуючих роботів поділяється на статичну та динамічну стійкість. Для забезпечення статичної стійкості робот повинен бути стійким протягом усього циклу ходи, без необхідності застосування будь-якої сили для балансування [10]. Поки робот статично стійкий, вертикальна проекція його центру мас (ЦМ) знаходиться в межах опорного багатокутника, який утворюється між кінцівками, що знаходяться у фазі опори. При виході ЦМ на межу або за межі опорного багатокутника робот падає, якщо він не є динамічно стійким, тобто робот збалансований під час ходьби за рахунок інерції, обумовленої рухом, і стає статично нестійким, коли припиняє рух. В залежності від обраного типу ходи статична та динамічна стійкість, а також швидкість переміщення роботів суттєво відрізняються [13, 14], тому в даній роботі розглядається трипедальна хода робота, як оптимальний варіант за параметрами швидкості та стійкості. На рис. 5 показано опорний полігон моделі гексаподу під час трипедальної ходи, де червоне коло позначає вертикальну проекцію його загального ЦМ, який знаходиться в межах червоного опорного трикутника. Для досягнення статичної стійкості при проектуванні послідовності фаз руху для гексаподу необхідно утримувати центр мас гексапода всередині опорного трикутника.

Послідовність чергування фаз переносу та опори для кожної кінцівки, яка забезпечує статичну стійкість гексаподу, показано на рис. 6а, де темний колір позначає фазу опори, а світлий – фазу переносу. Така послідовність є характерною для крокуючого робота у бездефектному стані, коли всі кінцівки працездатні і працюють безвідмовно про-

тягом встановленого терміну руху. Але в реальних умовах руху по місцевості зі складним профілем поверхні частою подією є несправність, пошкодження чи втрата однієї з кінцівок, що вимагає аналізу поведінки крокуючого робота в такій ситуації. Вважаємо, що кінцівка, що стала несправною, не заважає руху іншим кінцівкам. Модифікуємо алгоритм трипедальної ходи з врахуванням того, що для стійкості необхідно забезпечити, щоб три кінцівки знаходились у фазі опори і утримували тіло робота, а дві кінцівки в цей час знаходились у фазі переносу, як це показано на оновленій діаграмі на рис. 6б. Очевидно, що при несправності/пошкодженні однієї кінцівки кількість рухів при виконанні одного переміщення буде відрізнятись, що призведе до зменшення швидкості.

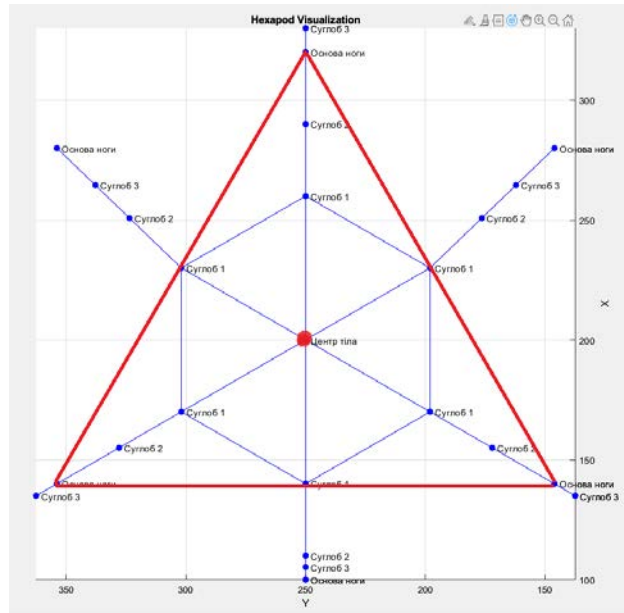


Рис. 5. Вид зверху опорного трикутника гексапода

	Крок 1			Крок 2		
	Фази руху					
	1	2	3	1	2	3
Кінцівка 1		■		■		■
Кінцівка 2	■		■		■	
Кінцівка 3		■		■		■
Кінцівка 4	■		■		■	
Кінцівка 5		■		■		■
Кінцівка 6	■		■		■	

а)

	Крок 1			Крок 2		
	Фази руху					
	1	2	3	1	2	3
Кінцівка 1						
Кінцівка 2	■		■	■		■
Кінцівка 3		■			■	
Кінцівка 4	■		■	■		■
Кінцівка 5		■		■		■
Кінцівка 6	■		■	■		■

б)

Рис. 6. Послідовність фаз переносу і опори при трипедальній ході: а) всі кінцівки бездефектні; б) при пошкодженні кінцівки 1

При підйомі кінцівки, яка знаходиться поряд із пошкодженою, центр мас буде зміщуватись за межі опорного трикутника і робот втратить статичну стійкість. Тому, як видно з рис. 6б, необхідною умовою є формування додаткової точки опори, що дещо модифікує трипедальну ходу, зокрема, в третій фазі руху гексапод матиме чотири точки опори, а оцінка стійкості буде відбуватись вже по опорному чотирикутнику (рис. 7).

Для моделювання прямих та зворотніх рівнянь кінематики в середовищі MATLAB було розроблено алгоритмічне та програмне забезпечення, яке дозволяє формувати алгоритм руху гексапода при різних умовах, блок-схему алгоритму наведено на рис. 8. За одне повне проходження алгоритму визначається положення всіх базових вузлів гексапода, обраховується нове положення центру мас, ці данні є початковими вхідними даними для наступної ітерації.

Розглянемо основні блоки наведеного алгоритму. Блок вхідних даних містить в собі всі дані, які відомі про модель гексапода від початку моделювання: геометричні розміри гексапода; початкове положення центру мас тіла; бажане переміщення центру мас за один цикл руху гексапода; послідовності фаз переносу та опори для усіх кінцівок гексапода. Після закінчення циклу руху положення тіла оновлюється та візуалізується, як на рис. 1. Блок визначення необхідного положення кінцівки отримує вхідні дані і на основі необхідного значення переміщення центра мас

тіла обраховує можливе положення кінцівок гексапода для здійснення цього переміщення за один цикл. Також враховується послідовність руху кінцівок таким чином, що обраховуються значення лише для кінцівок, що будуть знаходитись в фазі переносу, інші параметри залишаються незмінними, що зменшує навантаження на обчислювач. Схему роботи блоку наведено на рис. 9.

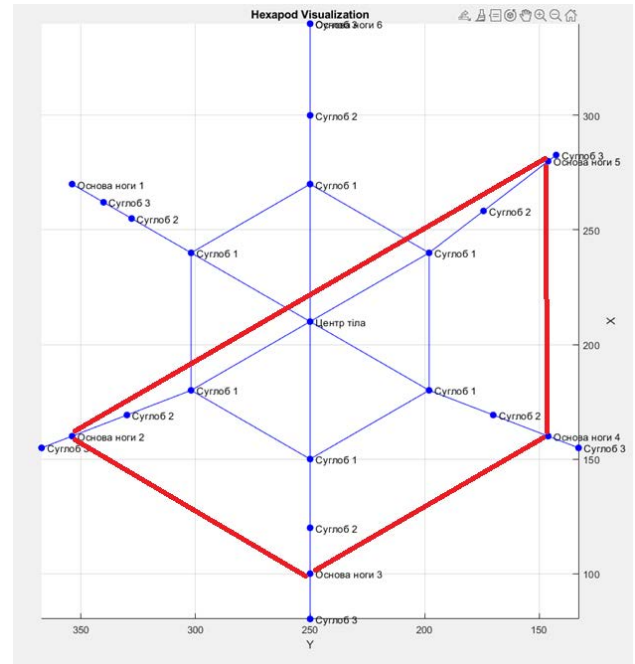


Рис. 7. Опорний чотирикутник для третьої фази в циклі руху

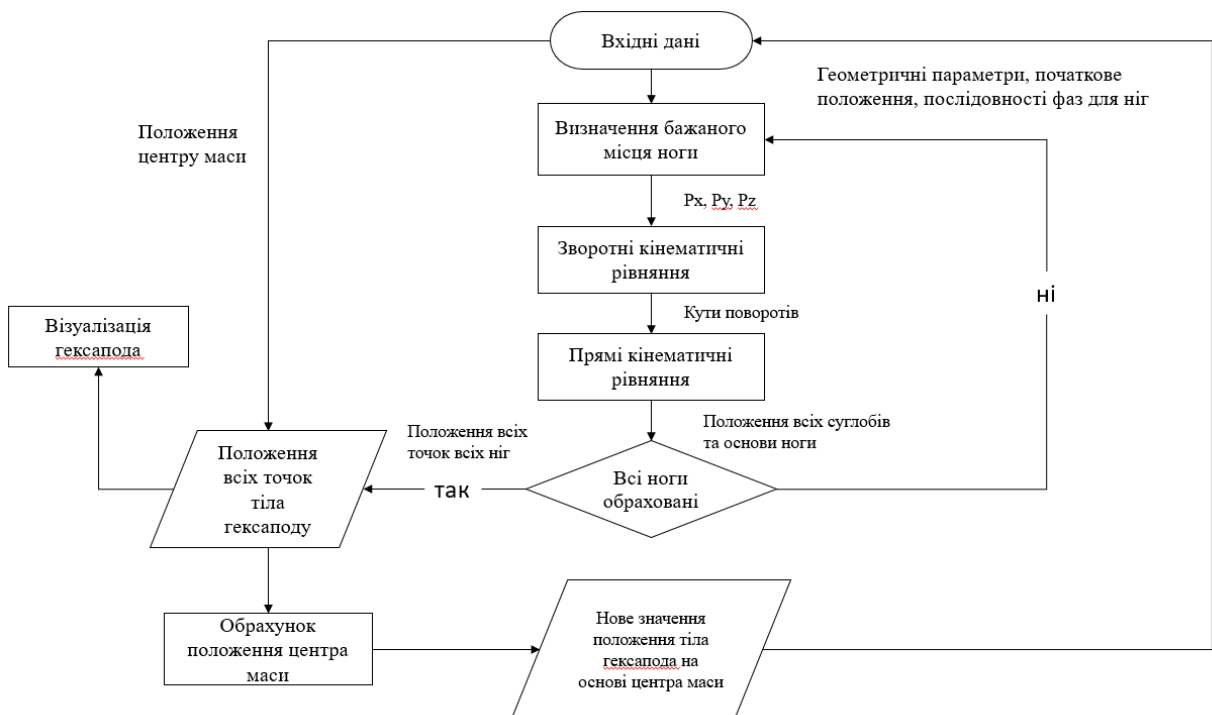


Рис. 8. Блок-схема алгоритму моделювання руху гексапода

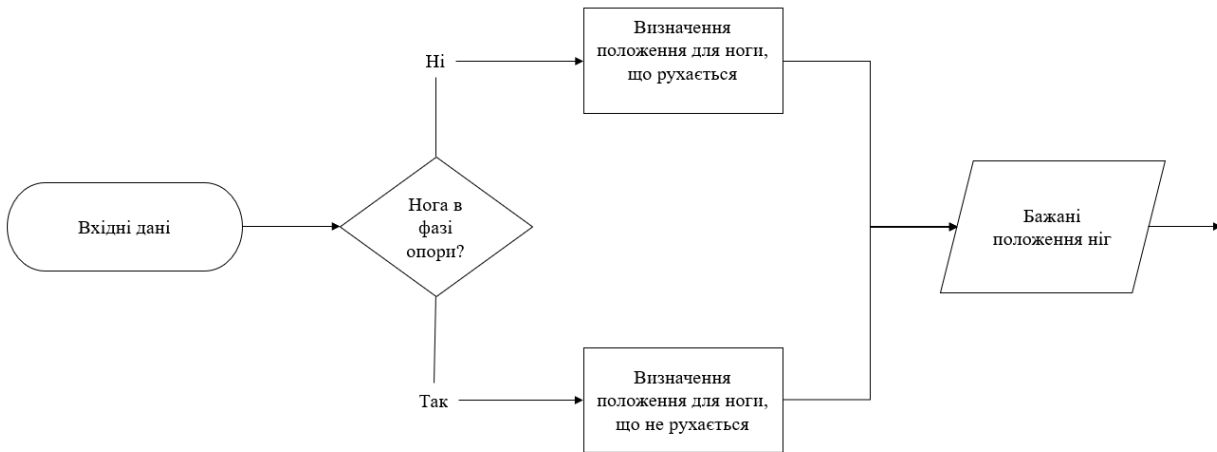


Рис. 9. Схема роботи блоку визначення бажаного положення кінцівок

На виході блоку (рис. 10) отримуємо координати положення, в яке потрібно перемістити основу кінцівки, які далі надходять до блоку зворотних кінематичних рівнянь разом з вхідними даними про габаритні розміри та початкове положення гексаподу. На основі рівнянь (6)–(13), які і складають даний блок, на виході блоку отримуємо значення кутів α , β , γ , їх значення далі передаються до блоку прямих кінематичних рівнянь, які визначають положення кожного суглобу та координат ланок, на виході блоку отримуємо повну інформацію про положення суглобів та основи кінцівки у просторі.

Описана процедура розрахунку повторюється для кожної кінцівки, після цього повний масив даних передається до блоку візуалізації гексапода. Програма у середовищі MATLAB візуалізує гексапод у скелетному вигляді, з'єднуючи вузли тіла гексапода [10].

Дані про положення всіх вузлів гексаподу передаються до блоку обчислення центра мас, який обчислює центри мас окремих кінцівок гексаподу та всього гексаподу. В результаті визначається поточне положення центру мас гексаподу у просторі, яке передається на вхідні дані, де воно стає новим початковим положенням, таким чином завершуючи цикл руху. Кожне положення центру мас записується у вектор значень, який потім використовується для побудови графіку переміщення гексаподу, що необхідно для подальшого аналізу руху гексаподу, наприклад, при несправності/пошкодженні кінцівки. На рис. 10 наведено графік траєкторії руху центру мас гексаподу при пошкодженій 1й кінцівці та запланована траєкторія руху. Як видно з наведеного результату моделювання, рух гексаподу залишається прямолінійним, але

несправність/пошкодження кінцівки призводить до зміщення траєкторії руху в бік пошкодженої кінцівки відносно запланованої траєкторії.

Результати моделювання дають можливість оцінити зміщення траєкторії та обрати метод для відновлення траєкторії руху для досягнення заданих координат під час руху з мінімальними втратами часу.

Висновки. Дана робота присвячена розробці математичної моделі та моделюванню крокуючого робота (гексапода) при невизначених умовах, наприклад таких, як пошкодження елементів робота, що при звичайних умовах призводить до неможливості виконання місії. Для цього в статті були вирішені пряма й обернена задачі кінематики, що дозволили розрахувати координати точок контакту кінцівок із поверхнею руху та кути повороту базових суглобів гексапода для імплементації в алгоритм керування.

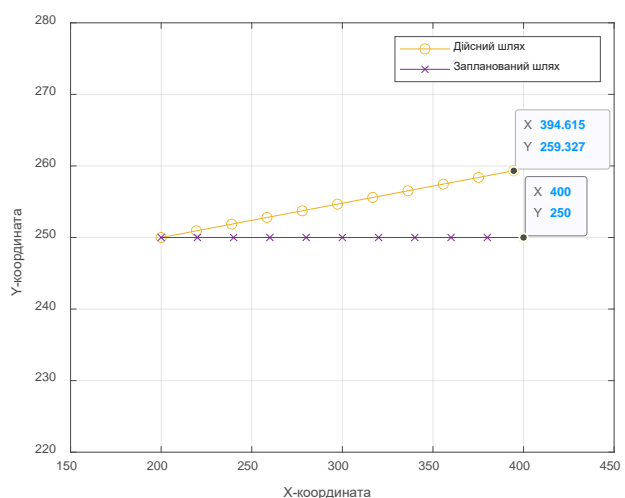


Рис. 10. Графік переміщення центра мас гексаподу при пошкодженій кінцівці 1

Всі розрахунки були проведені в середовищі MATLAB, що дозволило реалізувати візуалізацію скелетного вигляду гексаподу. Для більшої мобільності було обрано симетричну конструкцію корпусу у вигляді правильного шестикутника з розташованими на його вершинах кінцівками. Такий підхід дозволяє спростити розрахунки та збільшити кути повороту кінцівок в горизонтальній площині. Для переміщення гексапода обрано трипедальну ходу, для якої сформовано алгоритм переміщення та розраховано опорні точки у фазах

опори та переносу. Запропоновано та обгрунтовано модифікацію алгоритму ходи при несправності/пошкодженні однієї з кінцівок, за умови збереження статичної стійкості робота при русі. Представлена візуалізація гексапода та результати моделювання руху гексапода за запропонованим алгоритмом дають можливість оцінити зміни траєкторії руху робота при пошкодженні однієї з кінцівок, що може бути використано для відновлення чи корекції заданої траєкторії руху з мінімальними втратами часу.

Список літератури:

1. Rubio F, Valero F, Llopis-Albert C. A review of mobile robots: Concepts, methods, theoretical framework, and applications. *International Journal of Advanced Robotic Systems*. 2019;16(2). doi:10.1177/1729881419839596
2. Lyashenko V., Ahmad M. Ayaz, Belova N, Sotnik S. Modern Walking Robots: A Brief Overview. *International Journal of Recent Technology and Applied Science*, 2021. Vol 3, No. 2, P. 32-39. DOI: 10.36079/lamintang.ijortas-0302.252
3. Urrea C, Valenzuela L and Kern J (2016) Design, Simulation, and Control of a Hexapod Robot in Simscape Multibody. Applications from Engineering with MATLAB Concepts. in Tech. Available at: <http://dx.doi.org/10.5772/63388>.
4. Zhijun C., Qingxing X. Fault-tolerant gait design for quadruped robots with one locked leg using the GF set theory. *Mechanism and Machine Theory*. 2022, 178 (19–20):105069. DOI:10.1016/j.mechmachtheory.2022.105069
5. Хазанович Ю.Ю., Киричук Ю.В., Черепанська І.Ю. Метод визначення положення кінцівок крокуючого мобільного роботу у просторі. *Вчені записки ТНУ ім. В.І. Вернадського. Серія: Технічні науки*, 2023. Том 34 (73). №1. С. 136-143. DOI: <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2023.1/21>
6. Платов І.М., Павловський О.М., Павловська Ю.О. Алгоритми руху гексапода для оминання перешкод. Кутовий рух, *Bull. Kyiv Polytech. Inst. Ser. Instrum. Mak.*, 2021. Вип. 62(2), С. 58-64. DOI: [https://doi.org/10.20535/1970.62\(2\).2021.249214](https://doi.org/10.20535/1970.62(2).2021.249214)
7. Krenich S., Urbanczyk M. Six-legged walking robot for inspection tasks. *Solid State Phenomena*, 2011. Vol. 180. P. 137-144. DOI: <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/ssp.180.137>
8. Удовенко С. Г. Нечеткое управление автономным мобильным роботом с подкрепляемым обучением. *Системы обработки информации*, 2016. № 8(145). С. 56-62.
9. Cully, A., Clune, J., Tarapore, D. et al. Robots that can adapt like animals. *Nature*. 2015. № 521, 503-507. <https://doi.org/10.1038/nature14422>.
10. Короленко Я. Р. Робастна система керування рухом крокуючого мобільного робота/ 2024. *Магістерська дис. : 151 Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології*. 124 с.
11. Robot Inverse Kinematics With A Hexapod Leg. JustAnotherMakerChannel. 2023. – URL: <http://surl.li/ktcrtt>.
12. Gurel C. Hexapod Modelling, Path Planning, and Control. [Електронний ресурс]. Canberk Suat. Gurel. ResearchGate. – 2017. – Режим доступу до ресурсу: https://www.researchgate.net/publication/320386792_Hexapod_Modelling_Path_Planning_and_Control#pf34.
13. Ramdya, P., Thandiackal, R., Cherney, R. et al. Climbing favours the tripod gait over alternative faster insect gaits. *Nat Commun*. 2017. №8. 14494 <http://dx.doi.org/10.1038/ncomms14494>.
14. Платов І., Павловський О. Алгоритм руху автономного робота – гексапода для переміщення у вузьких замкнутих просторах. *Вісник Київського політехнічного інституту. Серія Приладобудування*. 2021. №61(1). Pp. 61-68. [https://doi.org/10.20535/1970.61\(1\).2021.237103](https://doi.org/10.20535/1970.61(1).2021.237103)

Korolenko Ya.R., Pavlovska Yu.O. SIMULATION OF THE MOVEMENT OF A WALKING ROBOT WITH A DAMAGED LIMB IN MATLAB

The article is dedicated to the development of a mathematical model and simulation of the movement of a hexapod walking robot. A review of literature sources was conducted, revealing a significant number of studies on this topic. Existing research has shown that for the practical application of the proposed methodological and algorithmic developments, a systematic approach is required. This approach would allow the formation of an adaptive control algorithm for the hexapod's movement in uncertain conditions. To implement such an algorithm, it was necessary to create a mathematical model that accounts for the hexapod's movement in the

event of malfunction or failure of one of its limbs, to study the kinematics of the hexapod's movement, select algorithms for stable walking, and simulate and investigate its movement when a limb is damaged or lost.

To achieve this, the article solves both direct and inverse kinematics problems, enabling the calculation of the contact points of the limbs with the surface and the rotation angles of the hexapod's base joints for implementation in the control algorithm. All calculations were carried out in the MATLAB environment, which made it possible to implement step-by-step calculations and visualize the skeletal structure of the hexapod. For greater mobility, a symmetrical body design in the form of a regular hexagon with limbs positioned at its vertices was chosen. This approach simplifies the calculations and increases the rotation angles of the limbs in the horizontal plane. A tripod gait was chosen for the hexapod's movement, and an algorithm for movement was developed along with the calculation of support points in the support and transfer phases. A modification of the gait algorithm was proposed and justified in the event of a limb malfunction or damage, provided that the robot maintains static stability during movement. The presented visualization of the hexapod and the results of the walking robot's movement simulation based on the proposed algorithm allow for the assessment of trajectory changes when a limb is damaged. This can be used to restore or correct the predefined movement trajectory with minimal time loss.

Key words: *modeling, robot, hexapod, mathematical model, center of mass, kinematics, limb damage, uncertain conditions, MATLAB.*

Лисенко О.І.

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

Тачинина О.М.

Національний авіаційний університет

Пономаренко С.О.

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

Фуртат О.В.

Таврійський національний університет імені В.І. Вернадського

Гетьман О.В.

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

Подобєд В.В.

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

МЕТОДИКА СИНТЕЗУ РЕГУЛЯРНОГО СПОСТЕРІГАЧА СТАНУ ДЛЯ ЦИФРОВИХ РЕГУЛЯТОРІВ ЕЛЕКТРОПРИВОДІВ НЕСУЧИХ ГВИНТІВ МАЛОЇ ЦИВІЛЬНОЇ АВІАЦІЇ

У статті запропонована методика синтезу регулярного спостерігача стану для цифрових регуляторів електроприводів несучих гвинтів малої цивільної авіації. Виконано розрахунок параметрів регулярного спостерігача стану (спостерігача Льюїнбергера) та імітаційне моделювання його роботи в детермінованих умовах та при дії випадкових збурень. Імітаційним моделюванням підтверджено теоретичні положення про те, що за допомогою спостерігача Льюїнбергера може бути обчислена («відновлена») кутова швидкість обертання ротора двигуна постійного струму (ДПС). Це означає, що спостерігач виконує функцію алгоритмічного вимірювача кутової швидкості ротора ДПС і тим самим вдається уникнути необхідності використання такого спеціального громіздкого, енерговитратного та ненадійного механічного пристрою, як тахогенератор. В якості вхідної інформації для алгоритмів керування ДПС пропонується використовувати вихідний сигнал спостерігача Льюїнбергера. При цьому алгоритми керування та спостереження можуть бути запрограмовані у одному і тому самому мікропроцесорі.

Розрахунки та імітаційне моделювання підтвердили теоретичні положення про те, що за допомогою спостерігача Льюїнбергера може бути обчислена («відновлена») кутова швидкість обертання ротора двигуна постійного струму (ДПС). Це означає, що спостерігач виконує функцію алгоритмічного вимірювання кутової швидкості ротора ДПС і тим самим вдається уникнути необхідності використання такого громіздкого, енерговитратного та ненадійного механічного пристрою, як тахогенератор в цифрових регуляторах електроприводів несучих гвинтів малої цивільної авіації.

У більшості випадків автономно-прогнозне оцінювання в технічних системах для інформаційного забезпечення алгоритму керування не використовують, тому що на практиці неможливо отримати достатньо точні початкові умови $x(0)$ та параметри математичної моделі і тому не можливо виконати достатньо точний прогноз стану системи на прийнятний для практичного використання інтервал часу.

Для подолання недоліків спостереження за розімкненим циклом на практиці частіше використовують спостерігачі із спостереженням за замкненим циклом (алгоритмом).

Ключові слова: функції аскег; спостерігачі Льюїнбергера, електроприводи несучих гвинтів, сенсори, математична модель, регулярний спостерігач.

Постановка проблеми. Електроприводи несучих гвинтів малої цивільної авіації (ЕНГ МЦА) активно модернізуються завдяки використанню цифрових електроприводів. Кількість цифрових електроприводів несучих гвинтів «літаючого джипа» або «літаючого таксі» може перевищувати декілька десятків. Апаратна модернізація вже вичерпала свої можливості. Підвищити надійність цифрових електроприводів несучих гвинтів, зменшити масогабаритні показники при незначному збільшенні енергоспоживання можливо завдяки лише алгоритмічній модернізації. Для малої цивільної авіації, яка використовує електричну енергію акумуляторів, принципово важливо не бути енерговитратною.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Для реалізації законів керування як у випадку SISO LTI математичної моделі ЕНГ МЦА (в подальшому будемо називати системи), так і випадку MIMO LTI математичної моделі ЕНГ МЦА (в подальшому будемо називати системи) необхідно мати інформацію про компоненти вектору стану системи. Цю інформацію можливо отримати завдяки використанню датчиків первинної інформації (ДПІ або сенсорів), які вимірюють окремі компоненти вектору стану системи або із використанням ДПІ (сенсорів), математичної моделі системи та спеціального алгоритму обробки вихідних сигналів цих ДПІ (сенсорів), який називається спостерігач стану. Саме використання алгоритмічного способу вимірювання компонент вектору стану системи і дозволяє відмовитися від частини механічних датчиків і тим самим покращити показники надійності та ресурсної і енергетичної ефективності системи.

В загальному випадку під спостерігачем стану (СС) розуміють способи, процедури або алгоритми отримання первинної інформації про всі компоненти вектору стану системи за результатом вимірювання значень окремих компонент вектору стану системи або значень функцій від однієї або декількох компонент вектору стану системи. Спостерігачі стану поділяються на спостерігачі із спостереженням за розімкненим циклом (алгоритмом) та спостерігачі із спостереженням за замкненим циклом (алгоритмом). Перейдемо до математичного формулювання задачі дослідження.

Постановка завдання. Спостерігачі стану із спостереженням за розімкненим циклом

Спостереження за розімкненим циклом ще називають **прогнозним оцінюванням** або **евристичним спостереженням (евристичним спостерігачем)**.

В ідеальному випадку, якщо точно відомо $x(0)$ та керуючий вплив $u(n)$, $n = 0; 1; 2; \dots$, а також математична модель системи, наприклад, у вигляді рівнянь у просторі станів

$$\begin{cases} x(n+1) = Ax(n) + Bu(n), \\ y(n) = Cx(n), \end{cases} \quad (1)$$

де вважаємо що матриці A, B точно відомі і з часом не змінюються, і при цьому відсутні непередбачені зовнішні збурення, реальний вектор стану $x(n)$ можна оцінити (обчислити) за допомогою розв'язання першого рівняння системи (1) в режимі реального часу. Підкреслимо, якщо у рівнянні спостереження системи (1) $C = I$ (одична матриця), то це означає, що всі компоненти вектору стану безпосередньо вимірюються і при цьому вимірюються абсолютно точно.

Прогнозоване оцінювання вектору стану системи доцільно використовувати при тимчасових збоях у роботі ДПІ для отримання інформації протягом декількох кроків або для фільтрації аномальних впливів, коли значення поточного виміру порівнюють із прогнозованим на 1 крок значенням і відкидають цей вимір, якщо він виходить за встановлені межі. Крім того, наприклад, можливо такий режим «віртуального вимірювання» передбачити як режим кризового вимірювання у випадку аварійної ситуації.

У більшості випадків автономно-прогнозне оцінювання в технічних системах для інформаційного забезпечення алгоритму керування не використовують, тому що на практиці неможливо отримати достатньо точні початкові умови $x(0)$ та параметри математичної моделі (1) і тому не можливо виконати достатньо точний прогноз стану системи на прийнятний для практичного використання інтервал часу.

Виклад основного матеріалу. Для подолання недоліків спостереження за розімкненим циклом на практиці частіше використовують спостерігачі із спостереженням за замкненим циклом (алгоритмом).

Спостерігачі стану із спостереженням за замкненим циклом

Спостерігачі стану за замкненим циклом ще носять назву **регулярних спостерігачів**.

Задачею спостерігача стану є обчислення точного значення вектору стану або визначення його апроксимації (наближеного значення) за інформацією про виміри $y(n)$ та про математичну модель об'єкта керування. Це означає, що необхідно знайти такий функціонал F , що

$$\hat{x}(n) = F(y(i), i = 0; 1; 2; \dots; n) \approx x(n). \quad (2)$$

Після того, як вектор стану встановлено ($\hat{x}(n) \approx x(n)$), знайдене значення можна використовувати в законах керування.

Зазвичай, побудові спостерігача стану передує дослідження системи на спостерігаємість. Припустимо що умова спостерігаємість для системи (1) виконується. Перейдемо до побудови алгоритму функціонування регулярного спостерігача, який отримав назву спостерігач Льюїнбергера.

Під терміном **спостерігач Льюїнбергера** розуміють спеціальний алгоритм обробки вектору

вихідного сигналу системи (об'єкта керування (ОК)) (1) $y(n)$, який дозволяє отримати оцінку вектору стану у вигляді

$$\hat{x}(n+1) = A \cdot \hat{x}(n) + B \cdot u(n) + H \cdot (\hat{y}(n) - y(n)). \quad (3)$$

Підкреслимо, що в теорії спостерігача Льюїнбергера вважається, що сигнал $y(n)$ вимірюється абсолютно точно.

Матрицю H (матрицю зворотного зв'язку спостерігача) обирають, виходячи з умови

$$\lim_{n \rightarrow \infty} (\hat{y}(n) - y(n)) = \lim_{n \rightarrow \infty} (C \cdot \hat{x}(n) - C \cdot x(n)) = \lim_{n \rightarrow \infty} (C \cdot (\hat{x}(n) - x(n))) = 0.$$

Записана умова означає асимптотичне наближення з плином часу оцінки вектору стану $x(n)$ системи до істинного значення вектору стану системи $x(n)$.

Розглянемо один із можливих варіантів розрахунку кількісних значень елементів матриці H . Відніmemo від правої та лівої частин рівняння (3) відповідно праву та ліву частини першого рівняння системи (1). В результаті отримаємо різницеве рівняння, що описує зміну в дискретному часі помилки степення $\Delta x(n)$ оцінки вектору стану системи $\hat{x}(n)$ за його істинним значенням $x(n)$

$$\Delta x(n+1) = A \cdot \Delta x(n) + H \cdot C \cdot \Delta x(n) = (A + H \cdot C) \cdot \Delta x(n), \quad (4)$$

де $\Delta x(n) = \hat{x}(n) - x(n)$.

Розв'язок різницевого рівняння (4) з плином часу прямує до нуля, якщо корені характеристичного рівняння

$$\det(z \cdot I - (A + H \cdot C)) = 0, \quad (5)$$

де I – одинична матриця, розташовані у середині кола одиничного радіусу, тобто модуль кожного кореня менший за одиницю. Якщо задати бажані значення коренів характеристичного рівняння, то можна обчислити кількісні значення елементів матриці H . Пам'ятаємо, що матриці A та C відомі, тому що відомою вважається математична модель системи у вигляді (1).

Як приклад, розглянемо процедуру обчислення кількісних значень елементів матриці H спостерігача Льюїнбергера, який пропонується використовувати в цифровій системі автоматичного керування (ЦСАК) двигуном постійного струму (ДПС), при умові, що спеціальним цифровим датчиком первинної інформації (ДПІ, сенсором) виконується вимірювання струму якоря ДПС, тобто в системі (1) матриці A , C мають вигляд [23]:

$$A = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} \\ a_{21} & a_{22} \end{bmatrix}, C = [1 \ 0].$$

Характеристичне рівняння буде квадратним рівнянням

$$\det \left(\begin{bmatrix} z & 0 \\ 0 & z \end{bmatrix} - \left(\begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} \\ a_{21} & a_{22} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} h_{11} \\ h_{21} \end{bmatrix} \cdot [1 \ 0] \right) \right) = 0 \leftrightarrow$$

$$\leftrightarrow \det \left(\begin{bmatrix} z & 0 \\ 0 & z \end{bmatrix} - \left(\begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} \\ a_{21} & a_{22} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} h_{11} & 0 \\ h_{21} & 0 \end{bmatrix} \right) \right) = 0 \leftrightarrow$$

$$\leftrightarrow \det \left(\begin{bmatrix} z & 0 \\ 0 & z \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} a_{11} - h_{11} & a_{12} \\ a_{21} - h_{21} & a_{22} \end{bmatrix} \right) = 0 \leftrightarrow$$

$$\leftrightarrow \det \left(\begin{bmatrix} z - (a_{11} - h_{11}) & -a_{12} \\ -(a_{21} - h_{21}) & z - a_{22} \end{bmatrix} \right) = 0 \leftrightarrow$$

$$\leftrightarrow (z - (a_{11} - h_{11})) \cdot (z - a_{22}) - a_{12} \cdot (a_{21} - h_{21}) = 0 \leftrightarrow$$

$$\leftrightarrow z^2 - (a_{11} + a_{22} - h_{11}) \cdot z + (a_{22} \cdot (a_{11} - h_{11}) - a_{12} \cdot (a_{21} - h_{21})) = 0 \leftrightarrow$$

$$\leftrightarrow (z - z_{b1}) \cdot (z - z_{b2}) = 0,$$

де $z_{b1,2}$ – бажані значення коренів характеристичного рівняння, які задає дослідник.

Використовуючи співвідношення між коренями та коефіцієнтами алгебраїчного рівняння, отримаємо систему рівнянь, яка дозволяє обчислити елементи матриці $H = \begin{bmatrix} h_{11} \\ h_{21} \end{bmatrix}$ спостерігача Льюїнбергера:

$$\begin{cases} a_{11} + a_{22} - h_{11} = z_{b1} + z_{b2}; \\ a_{22} \cdot (a_{11} - h_{11}) - a_{12} \cdot (a_{21} - h_{21}) = z_{b1} \cdot z_{b2} \end{cases} \quad (6)$$

за відомими елементами матриці A та відомими бажаними значеннями коренів характеристичного рівняння $z_{b1,2}$. Підкреслимо, що структура матриці H обрана спеціально такого виду, щоб кількість рівнянь в системі (6) дорівнювала кількості невідомих.

Пошук значень елементів матриці H можна виконати із використанням функції **acker** системи комп'ютерної математики (СКМ) MATLAB, яка розв'язує рівняння вигляду

$$\det(z \cdot I - (A + B \cdot K)) = 0 \quad (7)$$

відносно невідомих елементів матриці K при умові, що матриці A, B та бажані значення коренів характеристичного рівняння (7) задані. Звернення до функції **acker** (при умові, що розглядається двовимірною математична модель ДПС) має вигляд **acker(A,B,[z_{b1} z_{b2}])**.

Рівняння (7) відрізняється від рівняння (5), яке необхідно розв'язати за допомогою функції **acker** розташуванням матриці, елементи якої необхідно обчислити. Тому перед застосуванням функції **acker** приведемо рівняння (5) до тієї структури, із якою узгоджено застосування функції **acker**, тобто матриця із невідомими елементами повинна бути розташована з права по відношенню до матриці із відомими елементами. Виконаємо транспонування матриць у виразі, що стоїть у дужках у рівнянні (5) (пам'ятаємо, що операція транспонування квадратної матриці не змінює коренів характеристичного рівняння, яке із цією матрицею пов'язане)

$$\det(z \cdot I - (A^T + C^T \cdot H^T)) = 0.$$

Остаточне звернення до функції **acker** в задачі розв'язання рівняння (5) відносно елементів матриці H може бути записане наступним чином

$$\text{acker}(A^T, C^T, [z_{b1} \ z_{b2}]).$$

Постановка задачі дослідження:

1) побудувати спостерігач Льюїнбергера для ДПС при умові, що вимірюється струм якоря ДПС за допомогою спеціального цифрового сенсора (цифрового ДПП);

2) підтвердити імітаційним моделюванням теоретичні положення, із яких випливає, що за допомогою спостерігача Льюїнбергера може бути обчислена («відновлена») кутова швидкість обертання ротора ДПС.

Розв'язання задачі дослідження Методика побудови (синтезу) спостерігача стану замкненого типу (спостерігача Льюїнбергера)

1. Задати вихідні дані (радати матриці A, C і визначити структуру матриці H).

2. Задати бажані значення коренів характеристичного рівняння спостерігача.

3. Обчислити елементи матриці H.

4. Побудувати в СКМ MATLAB+Simulink комп'ютерну математичну модель підключення спостерігача Льюїнбергера до системи (об'єкта) спостереження.

5. Виконати обчислювальний експеримент в умовах моделювання абсолютно точного вимірювання компонент вектору стану системи (об'єкту), для яких побудовано спостерігач Льюїнбергера.

6. Виконати імітаційне моделювання роботи спостерігача Льюїнбергера в умовах дії збурень, що пов'язані із роботою цифрового ДПП (похибка вимірювання та помилка квантування за рівнем АЦП).

7. Висновок.

Виконання етапів методики

Етап 1.

Задаємо вихідні дані із використанням дискретної (цифрової) математичної моделі ДПС [4,5,22]:

$$A=[0.1841 \ -0.2256; \ 0.2256 \ 0.9359]$$

$$C=[1 \ 0]$$

Етап 2.

Задаємо однакові значення коренів характеристичного рівняння:

$$z_{b1}=0.5$$

$$z_{b2}=0.5$$

Етап 3.

Обчислюємо кількісні значення елементів матриці зворотного зв'язку спостерігача Льюїнбергера із використанням функції **acker** СКМ MATLAB+Simulink

$$H=(\text{acker}(A', C', [z_{b1} \ z_{b2}])))'$$

$$H05 =$$

$$0.1200$$

$$-0.6166$$

Етап 4.

Комп'ютерна математична модель підключення дискретного спостерігача Льюїнбергера до неперервної математичної моделі двигуна постійного струму (ДПС) представлена на рис. 1.

На рис. 1 позначено: 1 – блок моделювання першої керуючої дії (електрична напруга, що подається у ланцюг якоря ДПС); 2 – блок моделювання другої керуючої дії (гальмуючий момент, що діє на ротор ДПС); 3 – неперервна математична модель ДПС; 4 та 5 – нелінійні математичні моделі цифрових сенсорів (ДПП), які вимірюють керуючі

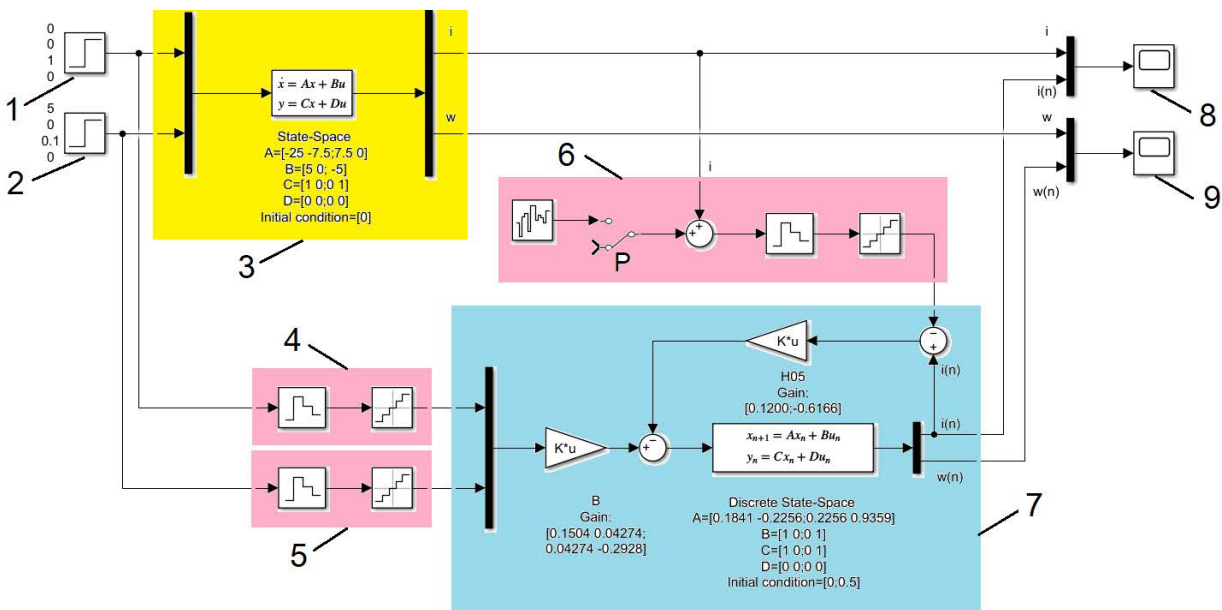


Рис. 1. Блок-схема виконання обчислювального та імітаційного експерименту в СКМ MATLAB+Simulink для перевірки теоретичних положень стосовно побудови та функціонування спостерігача Льюїнбергера

дії (період квантування за часом дорівнює 0.06 с, крок квантування за рівнем дорівнює 0.01 відносної одиниці); 6 – нелінійна математична модель цифрового сенсора (ДПС), який вимірює електричний струм у ланцюзі якоря ДПС (у відповідних блоках встановлено: період квантування за часом дорівнює 0.06 с та крок квантування за рівнем 0.01 відносної одиниці); P – перемикач, який дозволяє підключити випадковий процес типу білого шуму для імітації впливу зовнішнього збурення на результат вимірювання однієї з компонент вектору стану ДПС, якою є струм якоря (інтенсивність білого шуму встановлено 0.0001 відносної одиниці)); 7 – спостерігач Льюїнбергера (звертаємо увагу на те, що H05 – це той самий коефіцієнт зворотного зв'язку у спостерігачі Льюїнбергера,

який було обчислено за допомогою функції **acker**, а також на те, що зворотній зв'язок із матричним коефіцієнтом підсилення H05 є від'ємним, що досягається завдяки використанню знаку «мінус» у суматорі); 8 та 9 – осцилографи, які дозволяють спостерігати зміну в часі струму у ланцюзі якоря ДПС та швидкості його обертання.

Етап 5.

Результат обчислювального експерименту в умовах абсолютно точних вимірів представлено на рис. 2.

Етап 6.

Результат імітаційного моделювання в умовах дії зовнішніх випадкових збурень на сенсори, що вимірюють складові вектору стану системи (об'єкта) представлено на рис. 3.

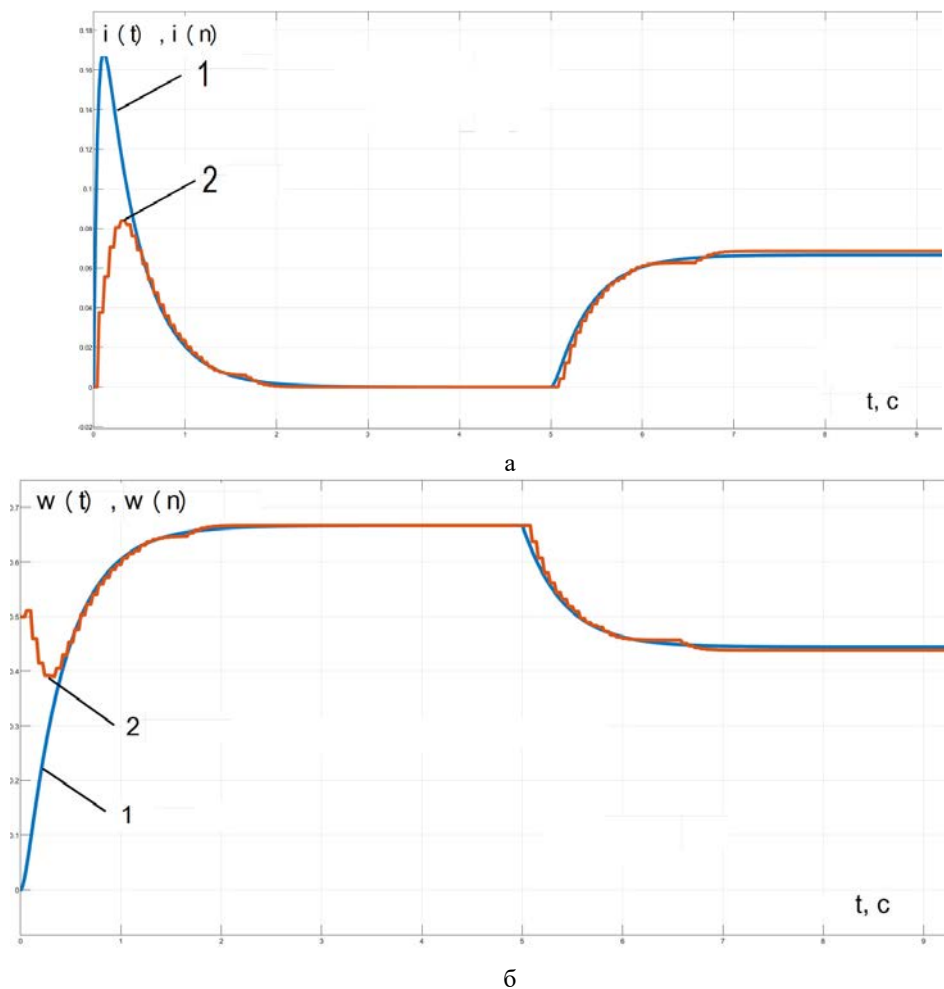


Рис. 2. Графіки зміни в часі вихідних сигналів математичних моделей 3 та 7 (див. рис. 1) при проведенні обчислювального експерименту в умовах абсолютно точного вимірювання струму якоря ДПС (перемикач P математичної моделі 6 цифрового сенсора вимірювання струму у ланцюзі якоря ДПС перебуває у нижньому положенні)

а) 1 – графік зміни в часі струму у ланцюзі якоря ДПС $i(t)$, тобто $i(t)$ вихідний сигнал неперервної математичної моделі 3; 2 – графік зміни в часі обчисленого за допомогою спостерігача Льюїнбергера струму у ланцюзі якоря ДПС $i(n)$, тобто $i(n)$ вихідний сигнал дискретного спостерігача Льюїнбергера 7;

б) 1 – графік зміни в часі кутової швидкості ротора ДПС $w(t)$, тобто $w(t)$ вихідний сигнал неперервної математичної моделі 3; 2 – графік зміни в часі обчисленої за допомогою спостерігача Льюїнбергера кутової швидкості обертання ротора ДПС $w(n)$, тобто $w(n)$ вихідний сигнал дискретного спостерігача Льюїнбергера 7

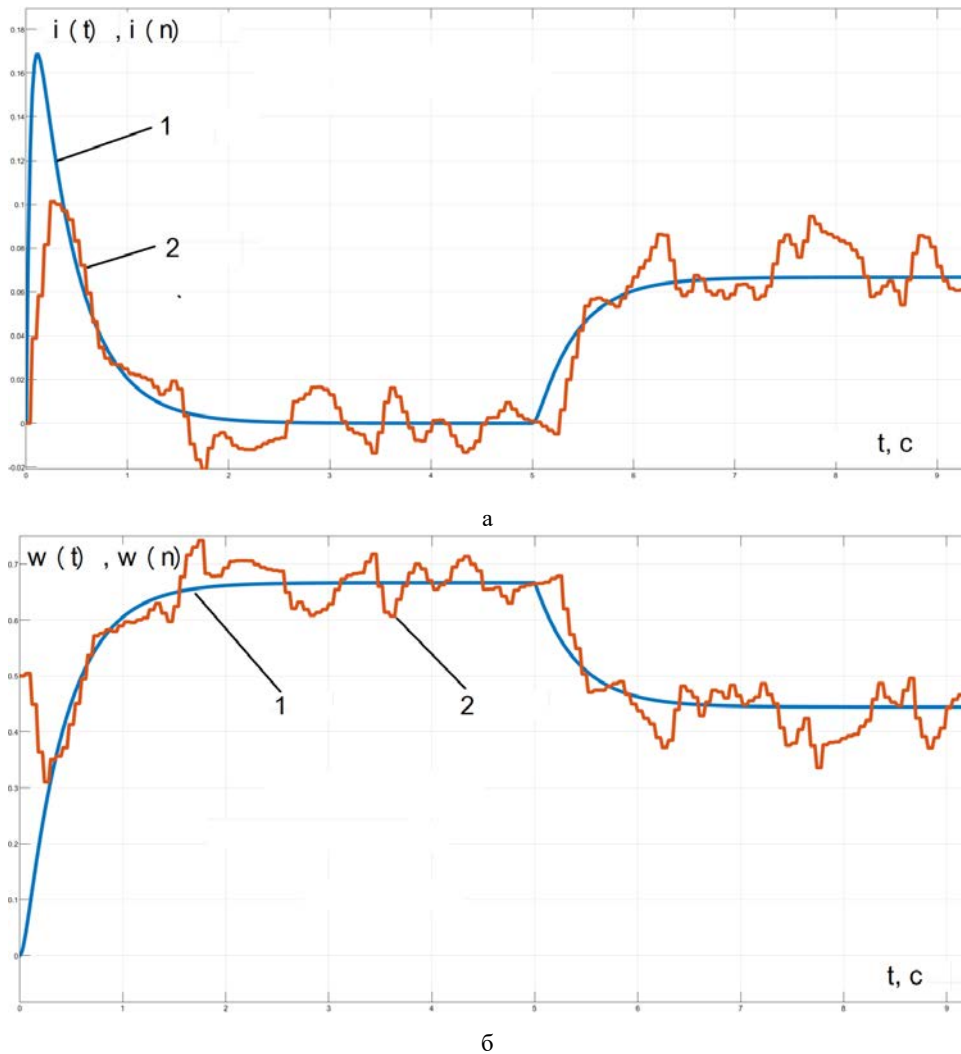


Рис. 3. Графіки зміни в часі вихідних сигналів математичних моделей 3 та 7 (див. рис. 15.1) при проведенні імітаційного моделювання роботи спостерігача Льюїнбергера в умовах збурених білим шумом вимірювань струму якоря ДПС цифровим сенсором (ДШ) 6 (перемикач Р математичної моделі 6 цифрового сенсора вимірювання струму у ланцюзі якоря ДПС перебуває у верхньому положенні)
 а) 1 – графік зміни в часі струму у ланцюзі якоря ДПС $i(t)$, тобто $i(t)$ вихідний сигнал неперервної математичної моделі 3; 2 – графік зміни в часі обчисленого за допомогою спостерігача Льюїнбергера струму у ланцюзі якоря ДПС $i(n)$, тобто $i(n)$ вихідний сигнал дискретного спостерігача Льюїнбергера 7;
 б) 1 – графік зміни в часі кутової швидкості ротора ДПС $w(t)$, тобто $w(t)$ вихідний сигнал неперервної математичної моделі 3; 2 – графік зміни в часі обчисленої за допомогою спостерігача Льюїнбергера кутової швидкості обертання ротора ДПС $w(n)$, тобто $w(n)$ вихідний сигнал дискретного спостерігача Льюїнбергера 7

Висновки. Розрахунки та імітаційне моделювання підтвердили теоретичні положення про те, що за допомогою спостерігача Льюїнбергера може бути обчислена («відновлена») кутова швидкість обертання ротора двигуна постійного струму (ДПС). Це означає, що спостерігач виконує функцію алгоритмічного вимірювання кутової швидкості ротора ДПС і тим самим вдається уникнути необхідності використання такого громіздкого, енерговитратного та ненадійного механічного пристрою, як тахогенератор в цифрових регуляторах електроприводів несучих гвинтів малої цивільної авіації.

1. В якості вхідної інформації для алгоритмів керування ДПС пропонується використовувати вихідний сигнал спостерігача Льюїнбергера. При цьому алгоритми керування та спостереження можуть бути запрограмовані у одному і тому самому мікропроцесорі.

2. Виконання умови стійкості спостерігача забезпечується відповідним вибором елементів матриці коефіцієнтів зворотного зв'язку спостерігача H .

3. В реальних умовах ДПС перебуває під впливом випадкових збурень, а це означає, що окрім того, що сенсор (ДШ) вимірює не всі компоненти

вектору стану ДПС, а лише ті, які доступні для вимірювання (в даному випадку це струм якоря ДПС), ці виміри будуть збурені дією шумів. Тому вихідний сигнал спостерігача буде завжди відрізнятися від реального стану ДПС. Спостерігач Льюїнбергера може виконувати і фільтруючі функції, але він не є оптимальним фільтром. Для досягнення найменшого значення дисперсії помилки, треба використовувати спеціальні оптимальні фільтри.

4. В якості вимірювача струму якоря ДПС пропонується використовувати алгоритмічний цифровий сенсор (ДП), у якому аналоговий сигнал з чуттєвого елемента спочатку подається на аналоговий фільтр низьких частот (який сигнали із низькими частотами пропускає), потім сигнал подається на аналогово-цифровий перетворювач, далі на оптимальний цифровий фільтр, який максимально подавляє збурення і мінімально спотворює корисний сигнал і вже після цього цифровий сигнал з виходу сенсора подається на вхід цифрового спостерігача.

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), <https://www.diva-portal.org/smash/get/diva2:561097/FULLTEXT01.pdf>, last accessed 2023/03/10.
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), <https://doi.org/10.2514/6.2008-140>, last accessed 2023/03/10.
4. Tachinina O., Lysenko O., Alekseeva I., Sushyn I., Novikov V. Method of algorithmic correction of dynamic properties of special-purpose electric drive //October 03 - 07, 2022 Kharkiv, Ukraine. IEEE 3rd KhPI Week on Advanced Technology (KhPIWeek). – IEEE, 2022. – С. 263-266. pubs-permissions@ieee.org IEEE Catalog Number: CFP22Z72-ART. ISBN: 979-8-3503-9920-2
5. Lysenko, O., Tachinina, O., Alekseeva, I., Guida, O., Novikov, V., Sushyn, I. (2023). Methodology of Energy-Efficient Algorithmic Modernization of Dynamic Characteristics of Digital Electric Drives of Mechatronic Devices for Small Civil Aviation. In: Ostroumov, I., Zaliskyi, M. (eds) Proceedings of the International Workshop on Advances in Civil Aviation Systems Development. ACASD 2023. Lecture Notes in Networks and Systems, vol. 736. pp 152-165. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-031-38082-2_12
6. Oleksandr Lysenko, Olena Tachinina, Valeriy Novikov, Oleksandr Guida, Fedir Kirchu, Ihor Sushyn. Methodology of synthesizing digital regulators in precision electric drives for orientation and stabilization target tracking system of mobile robot's directional sensors. CEUR Workshop Proceedings, 2023, Vol. 3513, pp. 51-63. ISSN 1613-0073. <https://ceur-ws.org/Vol-3513/> **Springer (Scopus)**
7. 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), <https://doi.org/10.2514/6.2019-4486>, last accessed 2023/03/10.
8. 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), <https://doi.org/10.2514/6.2018-5009>, last accessed 2023/03/10.
9. Sforza, P.: Commercial Airplane Design Principles. Elsevier Science & Technology Books. Elsevier, Oxford (2014).
10. 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), <https://doi.org/10.1177/0954410011419612>, last accessed 2023/03/10.
11. Sforza, P.: Manned Spacecraft Design Principles. Elsevier Science & Technology Books. Elsevier, Oxford (2015).
12. Aliofkhaezai, M., Makhlof, A. S. H.: Handbook of Materials Failure Analysis with Case Studies from the Aerospace and Automotive Industries. Elsevier Science & Technology Books. Elsevier, Oxford (2015).
13. 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), <https://doi.org/10.2514/6.2009-629>, last accessed 2023/03/10.
14. Moir, I., Seabridge, A.: Design and Development of Aircraft Systems. John Wiley & Sons, Ltd, Chichester, UK (2012), <https://doi.org/10.1002/9781118469156>, last accessed 2023/03/10..
15. 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).

16. Lysenko, O., Tachynina, O., Ponomarenko, S., Guida O.: Optimal Branched Trajectories Theory. Igor Sikorsky KPI, Kyiv (2023), <https://ela.kpi.ua/handle/123456789/52094>, last accessed 2023/03/10.

17. 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).

18. Sforza, P.: Theory of Aerospace Propulsion. Elsevier Science & Technology Books, Oxford (2011).

19. 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), <https://doi.org/10.1155/2018/4258020>, last accessed 2023/03/10.

20. 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), <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2020.e05581>, last accessed 2023/03/10.

Lysenko, O.: HANDONG UNITWIN FELLOWSHIP (Republic of Korea). Course [S084-Ukraine] Mathematical programming and operations research in telecommunications, 14 Lectures. Fall 2017. <https://www.hufocw.org/Course/263>

Lysenko, O.: HANDONG UNITWIN FELLOWSHIP (Republic of Korea). Course "Digital automatic control systems for information communications engineers", 14 Lectures. Spring 2020. <https://www.hufocw.org/Course/197>

21. Graham C. Goodwin, Stefan F. Graebe, Mario E. Salgado.: Control System Design. Prentice Hall, Upper Saddle River, New Jersey 07458, 2001. ISBN – 0-13-958653-9

**Lysenko O.I., Tachynyna O.M., Ponomarenko S.O., Furtat O.V., Hetman O.V., Podobyed V.V.
METHODOLOGY FOR THE SYNTHESIS OF A REGULAR CONDITION MONITOR
FOR DIGITAL REGULATORS OF THE ELECTRIC DRIVES OF THE MAIN ROTORS
OF SMALL CIVIL AVIATION**

The article proposes a method of synthesis of a regular status monitor for digital controllers of electric drives of the main rotors of small civil aviation. Calculation of the parameters of a regular state observer (Lewinberger observer) and simulation modeling of operation under specified conditions and under the influence of random disturbances were performed. Simulation modeling confirmed the theoretical proposition that the angular velocity of the rotor of a DC motor can be calculated ("restored") with the help of a Lewinberger observer. This means that the observer performs the function of an algorithmic meter of the angular velocity of the DPS rotor and thereby avoids the need to use such a special cumbersome, energy-consuming and unreliable mechanical device as a tachogenerator. It is proposed to use the output signal of the Lewinberger observer as input information for DPS control algorithms. At the same time, control and monitoring algorithms can be programmed in the same microprocessor.

Calculations and simulations confirmed the theoretical proposition that the angular velocity of the rotor of a direct current motor (DC motor) can be calculated ("reconstructed") with the help of a Lewinberger observer. This means that the observer performs the function of algorithmic measurement of the angular speed of the DPS rotor and thus it is possible to avoid the need to use such a cumbersome, energy-consuming and unreliable mechanical device as a tachogenerator in the digital controllers of the electric drives of the main rotors of small civil aviation.

In most cases, autonomous predictive evaluation in technical systems is not used for information support of the control algorithm, because in practice it is impossible to obtain sufficiently accurate initial conditions and parameters of the mathematical model (1) and therefore it is not possible to make a sufficiently accurate forecast of the system state acceptable for practical use time interval. To overcome the shortcomings of open-loop monitoring, in practice, closed-loop monitoring (algorithm) monitors are more often used.

Key words: acker functions, Lewinberger observers, propeller drives, sensors, mathematical model, regular observer.

Лисюк Г.П.

Національний університет «Одеська політехніка»

СИНТЕЗ СИСТЕМИ УПРАВЛІННЯ ТЕПЛОВИМ НАВАНТАЖЕННЯМ БАРАБАННОГО КОТЛА ПРИ СПАЛЮВАННІ ТВЕРДИХ ПОБУТОВИХ ВІДХОДІВ

У статті досліджується тема термічної утилізації твердих побутових відходів у топках із киплячим шаром. Особливістю роботи таких сміттєспалювальних установок є різко змінний склад побутових відходів, що подаються на переробку. Також особливою відмінністю спалювання сміття є ризик утворення шкідливих сполук, таких як діоксиди сірки, оксиди азоту, сполуки хлору, діоксини та фурани. Для запобігання утворенню таких сполук дуже важливо підтримувати температуру киплячого шару.

Метою статті є розробка та дослідження системи автоматизованого управління тепловою потужністю спалювальної установки з компенсацією збурень навантаження та зміни складу палива на будь-якому рівні теплової потужності та збільшення ефективності процесу спалювання паливної суміші незалежно від її складу та поточного рівня потужності.

Для досягнення поставлених цілей були вдосконалені математичні моделі спалювання твердого палива змінного складу в топках з киплячим шаром, що циркулює, і урахуванням наявності в суміші спалюваних органічних сполук, в які входить сірка.

Математична модель була поділена на такі ділянки: модель процесу горіння твердого палива в псевдо-рідинному шарі; модель передачі тепла робочому тілу в радіаційних та конвективних поверхнях нагріву; модель викидів шкідливих речовин, насамперед оксидів сірки.

Синтезовано автоматизовану систему управління установкою. При цьому зазначені регульовані технологічні змінні, що керують впливом. Виділено чотири основні регулятори, а саме: потужності, температури шару, економічності та викидів шкідливих речовин.

Було ухвалено рішення відмовитися від введення в регулятор потужності сигналу про теплотворну здатність палива, оскільки різка зміна витрати паливної суміші може призвести до аварійних ситуацій. І навпаки, введення сигналу про теоретичну кількість повітря дозволяє збільшити точність підтримки такого складу димових газів, який відповідає мінімальним втратам теплоти від хімічного недопалу і газам, що відходять. А також за рахунок збільшеної кількості повітря дозволяє знизити температуру горіння палива в киплячому шарі.

Удосконалена математична модель динаміки барабанних котлів дозволить виконати математичне моделювання роботи вдосконаленої системи.

Ключові слова: термічна утилізація, спалювання, тверді побутові відходи, топка з киплячим шаром, системи автоматизованого управління, математична модель динаміки барабанних котлів.

Постановка проблеми. Проблемі оптимального спалювання органічних сполук завжди приділялася велика увага. Система контролю горіння є однією з основних систем керування пиччою або котла. Особливістю роботи сміттєспалювальних установок є різко змінний склад побутових відходів, що подаються на переробку. Стандартна схема управління котлами не компенсує коливання складу паливної суміші, які викликають зміну теплотворної здатності палива та кількості повітря, що подається на спалювання. Процес проводиться з його надлишком для запобігання утворенню шкідливих викидів. Системи управління, здатні компенсувати коливання складу паливної суміші, використовуються при спалюванні газоподібних сумішей.

Також особливою відмінністю спалювання сміття є ризик утворення шкідливих сполук, таких як діоксиди сірки, оксиди азоту, сполуки хлору, діоксини та фурани. Для запобігання утворенню таких сполук дуже важливо підтримувати температуру киплячого шару.

Тому вирішення проблеми регулювання та ефективного процесу спалювання теплогенеруючої установки на будь-якому рівні теплової потужності паливної суміші, незалежно від її складу та поточного рівня потужності, актуальне.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Класичні методи регулювання теплового навантаження розглянуто в [2, 3]. У розглянутій САК завданням управління є підтримка заданого тиску

перегрітої пари в режимі керування або заданої витрати перегрітої пари при роботі котла в базовому режимі. Такі системи автоматичного керування, як правило, реалізуються у двох модифікаціях – із сигналом витрати палива, коли до паливних пристроїв подається рідке або газоподібне паливо з постійною теплотворною здатністю, і з сигналом виділення тепла в камеру згорання, коли якісний склад рідкого або газоподібного палива непостійний. При зменшенні навантаження теплові потоки перерозподіляються в об'ємі топки і газоходів, що призводить до невизначеного зниження ККД. Тому даний спосіб регулювання теплової потужності в котлах не використовується при спалюванні вуглеводневого палива випадкового складу, який змінюється в часі [2].

В роботах [4–8] узагальнені методи розрахунку складу продуктів згорання, що дозволяє змоделювати майже всі органічні сполуки, які горять в повітряній атмосфері. Це дозволяє, незважаючи на велике розмаїття горючих речовин, описати процес утворення продуктів згорання і визначення їх температури за допомогою єдиної моделі.

Наведено САК теплового навантаження барабанного котла при спільно-роздільному спалюванні доменного, коксового та природного газів із випадковою зміною їх витрати [9, 10]. Для підвищення ефективності САК пропонується крім типової САК за допомогою «теплового» сигналу впровадити пристрої для компенсації випадкових збурень витрат цих газів. Наведено результати дослідження комбінованої системи та показано її ефективність при різних режимах роботи котла.

Постановка завдання. Метою статті є розробка та дослідження системи автоматизованого керування тепловою потужністю сміттєспалювальної установки з компенсацією збурень навантаження та зміни складу палива на будь-якому рівні теплової потужності та збільшити ефективність процесу спалення паливної суміші незалежно від її складу та поточного рівня потужності.

Для цього необхідно вирішити наступні задачі:

1. Розробити математичну модель котла, в якому теплотворна здатність паливної суміші ТПВ діє як збурювальний ефект, забезпечуючи при цьому постійність енерговиділення у топці котла.

2. Розробити спосіб та автоматизовану систему регулювання теплової потужності котла за теплотворною здатністю паливної суміші ТПВ при роботі котла на потужності, відмінній від номінальної.

3. Провести обчислювальний експеримент розробленої САК та визначити показники якості регулювання.

Для досягнення поставленої мети необхідно вдосконалити математичні моделі спалювання твердого палива змінного складу в топках з циркулюючим киплячим шаром, та врахування наявності у суміші, яка спалюється органічних сполук до яких входить сірка та хлор.

Виклад основного матеріалу. Математичну модель було розділено на наступні ділянки: модель процесу горіння твердого палива в псевдо-рідинному шарі; модель передачі тепла робочому тілу в радіаційних та конвективних поверхнях нагріву; модель викидів шкідливих речовин, насамперед оксидів сірки.

Математична модель процесу горіння твердого палива в псевдо-рідинному шарі.

У разі розгляду топки як об'єкта автоматизації насамперед викликають інтерес динамічні властивості системи, які далі використовуються для управління.

В [12] розроблено структуру математичної моделі топкового простору на основі методу декомпозиції (рис. 1).

Об'ємна витрата твердої паливної суміші V_{smo} з урахуванням поточних значень зольності A , вологості W і частки горючих органічних сполук різних паливних сумішей d_1 і d_2 приводиться до масових значень витрати горючої складової палива G_p вологи G_{H_2O} та інерту G_{in} , що надходять у киплячий шар.

Вихідними характеристиками в моделі є поточна температура киплячого шару T_{fb} і об'єм газоповітряної суміші на виході з шару V_{fb} .

Під час моделювання топкових процесів приймають такі допущення: маса інертного матеріалу m_{fb} , що знаходиться в шарі, є постійною величиною, з урахуванням безперервно працюючої системи золовидалення; суміш газів, що виходить із шару, має температуру, що дорівнює T_{fb} ; коефіцієнт надлишку повітря підтримується системою автоматичного управління в межах, достатніх для повного вигорання летючих і залишку від згорання відходів; усі зміни параметрів частинок відбуваються дуже різко при переходах між комірками; вигорання залишку від згорання відходів відбувається у внутрішньодифузійній області [13]; під час роботи котлоагрегату НТКС можливий перехід з одного складу паливної суміші на іншу зі зміною основних параметрів (зольності, вологості тощо).

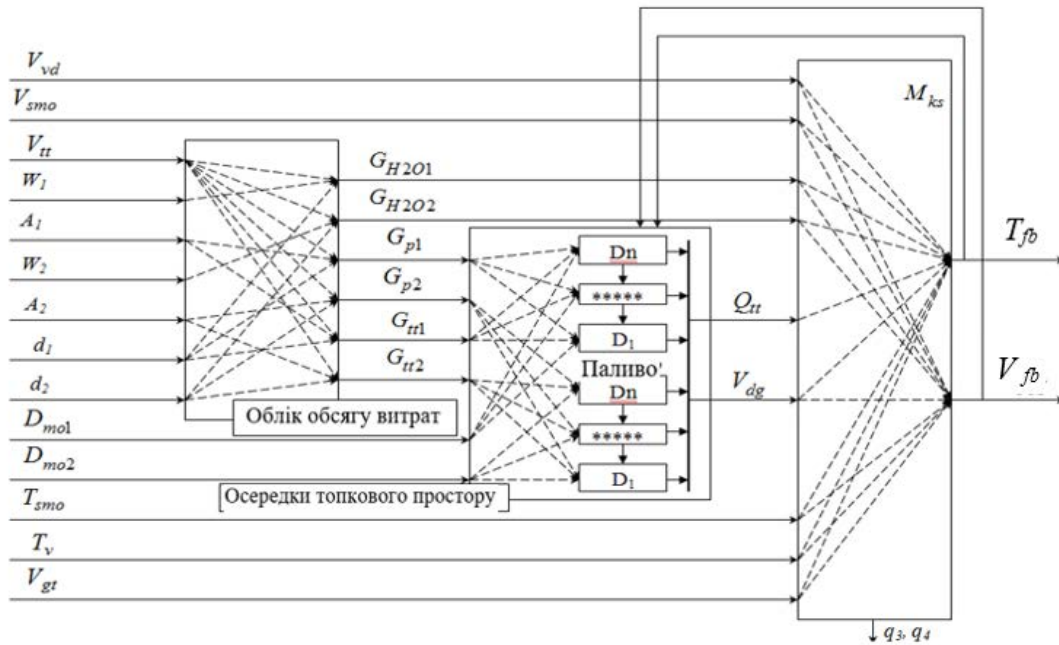


Рис. 1. Структура моделі топкового простору [20]

Виходячи з викладеного, рівняння теплового балансу має вигляд:

$$m_{fb} \frac{dI_{fb}}{dt} = Q_{fl} + Q_{air} + (Q_{F1} + Q_{F2})(1 - q_3 - q_4) - Q_{T1} - Q_{T2} - Q_{lime} - Q_{H2O} - Q_{SG}$$

де I_{fb} – питома ентальпія інертного матеріалу шару. Своєю чергою, залежність $T_{fb} = f(I_{fb})$ обчислюється як таблична величина за методикою [14]; Q_{fl} – кількість теплоти, яка одержана від згоряння рідкого палива під час розпалювання; Q_{air} – кількість теплоти, що вноситься за одиницю часу в топку дуттьовим повітрям; Q_{F1}, Q_{F2} – кількість теплоти, що вноситься в топку під час згоряння сухої горючої маси паливних сумішей 1 і 2, відповідно; Q_{T1}, Q_{T2} – кількість теплоти, що забирається під час нагрівання паливних сумішей 1 і 2 до температури шару; Q_{lime} – кількість тепла, що відбирається на прогрівання інерту, визначаються аналогічно; Q_{H2O} – кількість тепла, що відбирається з топки на випаровування і прогрівання до температури шару вологи, яка міститься в паливній суміші. При цьому передбачається, що цей процес відбувається миттєво після потрапляння палива в шар; Q_{SG} – кількість тепла, що відбирається з топки продуктами горіння твердих і рідких складових паливних сумішей, а також залишком дуттьового повітря, що не прореагував; q_3, q_4 – частка хімічного та механічного недопалу.

Докладне виведення залежностей наведено в роботі [12]. Далі обчислюється поточна ентальпія киплячого шару, а отже, і його температура, тобто основний технологічний параметр.

Експериментальні характеристики [12] зміни температури НТКШ у разі ступінчастих впливів за продуктивністю закидувача і дуттьового вентилятора відповідно (рис. 2 , 3).

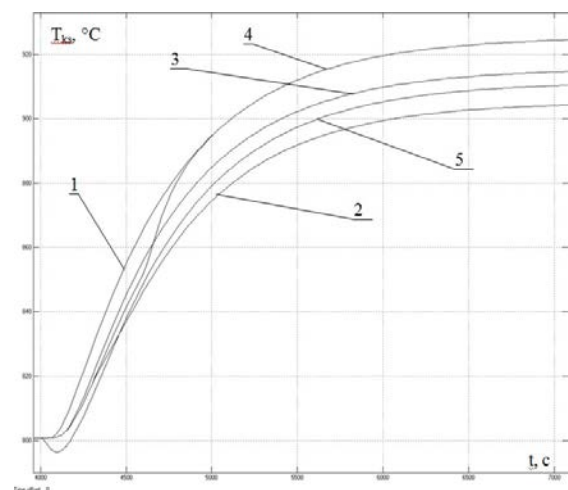


Рис. 2. Зміни температури НТКШ під час ступінчастого впливу за продуктивністю закидувача $\Delta V_F = +0,04 \text{ м}^3/\text{год}$ під час експерименту (лінії 1–4) і моделювання (лінія 5)

Зсув у часі в 4000 с обумовлений процесом розпалювання котлоагрегату.

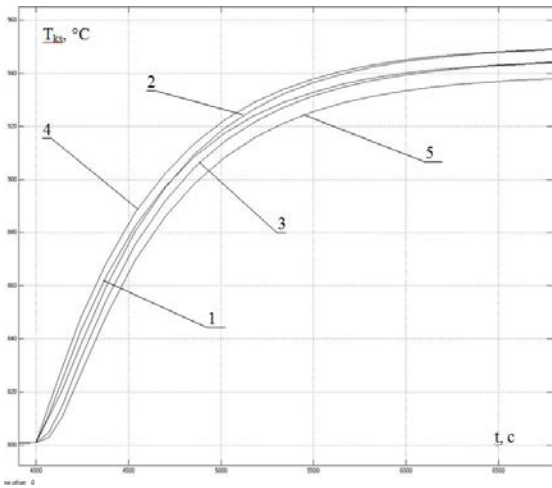


Рис. 3. Зміни температури НТКШ під час ступінчастого впливу за продуктивністю дуттьового вентилятора $\Delta V_{air} = -0,2 \text{ м}^3/\text{с}$; під час експерименту (лінії 1–4) і моделювання (лінія 5)

Після обробки кривих розгону були отримані передавальні функції за відповідними каналами:

$$W(s) = \frac{k}{Ts + 1} e^{-\tau s} = \frac{3750}{1900s + 1} e^{-120s};$$

$$W(s) = \frac{k}{Ts + 1} e^{-\tau s} = \frac{-700}{1750s + 1} e^{-80s}$$

Оскільки постійні часу і величини запізнювання визначаються геометричними розмірами апарата і повинні уточнюватися індивідуально для кожної установки, то на даному етапі дослідження прийняті відповідно до експериментальних даних [12].

Математична модель передачі тепла робочому тілу в радіаційних та конвективних поверхнях нагріву

Математична модель котла в якому спалюється ТПВ складається з 6 ділянок (рис. 4) [15, 16]. Кожна ділянка пронумерована. Вихід однієї ділянки є входом для іншої. Кожна ділянка описується диференціальним рівнянням. Як показано в [15], деякі розділи описуються двома диференціальними рівняннями. Ділянки 1 і 2 описують процеси теплообміну, пов'язані з радіаційним і конвективним нагріванням поверхонь. Ділянки 1' і 2' описують допоміжні диференціальні рівняння, що пов'язують вхідні дані з виділенням тепла випромінюванням і конвекцією. Ділянка 3 описує процеси, які відбуваються в барабані котла. Ділянка 4 описує паропровід.

На рисунку й надалі введені такі позначення:

Q_L^W – нижня теплота згоряння робочої маси палива; M_{mix} – витрата твердої паливної суміші; M_{air} – витрата повітря; Q_F – кількість тепла, що

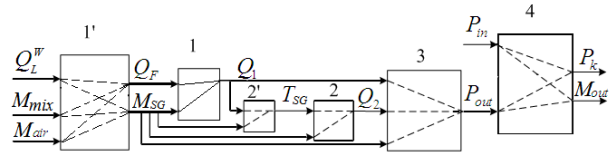


Рис. 4. Структура математичної моделі

виділяється при згорянні палива; M_{SG} – витрата димових газів; Q_1 – кількість тепла, що передається робочому тілу променистим теплообміном; Q_2 – кількість тепла, що передається робочому тілу конвективним теплообміном; T_{SG} – температура димових газів; P_{in} – тиск на вході в котел; P_{out} – тиск у барабані котла; P_k – тиск на виході з котла; M_{out} – витрата пари на виході з котла.

В першу чергу уточнимо модель виділення тепла при горінні.

Відомо, що тепло яке виділяється при спалюванні, може бути розраховане за формулою:

$$Q_F = M_{mix} Q_L^W \quad (1)$$

Так як модель спалювання розглядається у відхиленнях, проведемо лінеаризацію (1), та запишемо вираз у відхиленнях:

$$\bar{Q}_F + \Delta Q_F = (\bar{M}_{mix} + \Delta M_{mix})(\bar{Q}_L^W + \Delta Q_L^W) \quad (2)$$

Після відкриття дужок і врахування виразу (2) можна записати:

$$\Delta Q_F = \bar{M}_{mix} \Delta Q_L^W + \bar{Q}_L^W \Delta M_{mix} \quad (3)$$

Зазвичай другий доданок відкидається як такий що має другий порядок малості. Однак, так як відхилення теплотворної здатності біогазу настільки велике, то в даному випадку розрахунок в моделі проводиться за виразом (3).

Математична модель конвективного газоходу

У роботах [9, 17, 18] наведено виведення диференціальних рівнянь та входять до них коефіцієнтів. Тому тут наводяться лише результуючі співвідношення. Кількість теплоти, що передається від димових газів теплоносія, може бути описана системою рівнянь:

Тепловий баланс на боці газу, що гріє:

$$m_{SG} c_{SG} \frac{d\vartheta_{SG}}{dt} + Q = M_{SGin} c_{SGin} \vartheta_{SGin} - M_{SGout} c_{SGout} \vartheta_{SGout} \quad (4)$$

Баланс речовини на стороні димових газів (накопичення маси димових газів немає):

$$M_{SGout} = M_{SGin} \quad (5)$$

Відхилення кількості теплоти в системі "газ, що гріє – труба" конвекцією

$$\Delta Q_2 = 0.33k_4 \bar{M}_{SG}^{0.33} \frac{\bar{\vartheta}_m + \bar{\vartheta}_{out} - 2\bar{\vartheta}_m}{2\bar{M}_G} \Delta M_{SG} + 0.5k_4 \bar{M}_{SG}^{0.33} (\Delta \vartheta_{Gin} + \Delta \vartheta_{Gout}) \quad (6)$$

де M_{SG} – витрата димових газів; m_{SG} – маса газу в елементі; c_{SG} – питома теплоємність газів; θ_m – температура метала труб; ϑ_{SG} – температура газів; Q – тепловий потік від газу до стінки; k_4 – коефіцієнт.

Залежність кількості теплоті від витрати димових газів та температури газів у часі описується диференціальним рівнянням:

$$T_2 \frac{dQ_2}{dt} + \Delta Q_2 = a_2 \Delta M_{SG} + b_2 \frac{dM_{SG}}{dt} + c_2 \Delta \vartheta_{SGin}, \quad (7)$$

де

$$a_2 = c_{SG} \frac{0.33(4\bar{\vartheta}_{SGin} - \bar{\vartheta}_{SGout} - 3\theta_m)}{1 + \frac{2c_{SG}}{k_4} \bar{M}_{SG}^{0.33}};$$

$$b_2 = c_{SG} \frac{0.33m_{SG}(\bar{\vartheta}_{SGin} - \bar{\vartheta}_{SGout} - 2\theta_m)}{\bar{M}_{SG} \left(1 + \frac{2c_{SG}}{k_4} \bar{M}_{SG}^{0.33}\right)}$$

$$c_2 = \frac{1}{\frac{1}{k_4 \bar{M}_{SG}^{0.33}} + \frac{1}{2c_{SG} \bar{M}_{SG}}}; T_2 = \frac{c_{SG} m_{SG}}{k_4 \bar{M}_{SG}^{0.33} + 2c_{SG} \bar{M}_{SG}}$$

Мінімізація викидів шкідливих речовин

Аналіз чинних технологій спалювання показує, що одним із перспективних напрямів у розв'язанні проблеми спалювання органічного твердого палива, включно з питаннями розв'язання екологічних проблем, є спалювання в топках із циркулюючим киплячим шаром (ЦКШ).

Однією з основних переваг спалювання палива в киплячому шарі є можливість ефективного видалення діоксиду сірки SO_2 шляхом подачі в шар вапняку. При цьому протікають такі реакції:



Аналіз наявних даних [20] показує, що процес десульфурації вапняком найповніше (спостережуваний мінімум концентрації SO_2 в димових газах) відбувається при температурі шару на рівні 840–870°C. Слід зазначити, що такі температури є робочими температурами більшості топків з ЦКШ, тому що при цьому забезпечується необхідна ефективність вигорання палива і забезпечується безшлакова робота шару.

Спосіб та автоматизована система регулювання теплової потужності котла за теплотворною здатністю паливної суміші ТПВ при роботі котла на потужності, відмінній від номінальної.

Імітаційна модель об'єкта керування

Була розроблена імітаційна математична модель, яка описує динамічні властивості апарату за такими каналами: витрата паливної суміші $G_{ТПВ}$ – навантаження N ; витрата паливної суміші

$G_{ТПВ}$ – температура шару T ; витрата паливної суміші $G_{ТПВ}$ – рівень (товщина) шару S ; витрата води на охолодження інерту $G_{охл_в}$ – температура шару T ; витрата води на охолодження інерту $G_{охл_в}$ – навантаження N ; витрата води на охолодження інерту $G_{охл_в}$ – концентрація діоксиду сірки c_S ; витрата вапняку $G_{вапн}$ – концентрація діоксиду сірки c_S ; витрата золи $G_{зол}$ – рівень (товщина) шару S ; витрата первинного повітря Q_1 – рівень (товщина) шару S ; витрата первинного повітря Q_1 – тиск повітря перед розподільчою решіткою $Pair1$; витрата вторинного повітря Q_2 – склад димових газів (економічність) c_{O_2}, c_{CO_2} ; склад паливної суміші – навантаження N ; склад паливної суміші – температура шару T ; склад паливної суміші – склад димових газів (економічність) c_{O_2}, c_{CO_2} ;

Параметрична схема регульованого апарату представлена на рисунку 5:

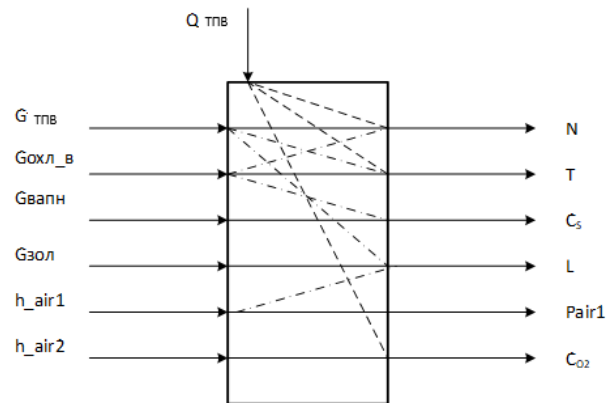


Рис. 5. Параметрична схема регульованого апарату

Методи керування топками киплячого шару

Метод регулювання навантаження, заснований на використанні взаємозв'язку між ступенем розширення киплячого шару і швидкістю охолодження для зміни висоти шару і, таким чином, зануреної величини теплосприймальної поверхні, забезпечує можливість отримання широкого діапазону регулювання навантаження з коротким перехідним процесом, тому що тепловий потік до заглиблених труб приблизно у 4 рази перевищує тепловий потік до труб, які перебувають над киплячим шаром.

Структурна схема імітаційної моделі об'єкта керування показана на рисунку 6.

Імітаційна модель, що наведена на рисунку, складається з чотирьох ділянок: моделі топки низько температурного киплячого шару «*Low Temp Fluorized Bed*»; моделі теплообмінних поверхонь «*heat transfer surface model*»; моделі

теплообміннику для охолодження шихти «*Inert Cooler*»; моделі зв'язування сполук сірки «*sulphur absorption models*».

Кожна з моделей була отримана у результаті попередніх досліджень [9, 10, 11, 12, 15, 17].

Таким чином в об'єкті регульованими параметрами є: навантаження (вимірюваним параметром може бути тиск пари після котла); температура киплячого шару; концентрація діоксиду сірки в димових газах; економічність процесу спалення (вимірюваним параметром є склад димових).

Керуючими впливами є: витрата паливної суміші (ТПВ); витрата води на охолодження шихти; витрата вапняку; витрата вторинного повітря.

Зовнішніми збуреннями на об'єкт є: задане навантаження (потужність) установки; склад паливної суміші (ТПВ).

Схему імітаційної моделі АСК установки для спалення ТПВ показано на рисунку 7.

На рисунку застосовано такі позначення:

Boiler – об'єкт управління, описаний вище і структурна схема якого наведена на рисунку 6; *PowerContr* – регулятор потужності установки; *AirContr* – регулятор економічності (витрати повітря); *FlBedTempContr* – регулятор температури киплячого шару; *LimeFlowContr* – регулятор витрати вапна; *Waste Composition Disturb* – пристрій моделювання складу паливної суміші; *Load*,

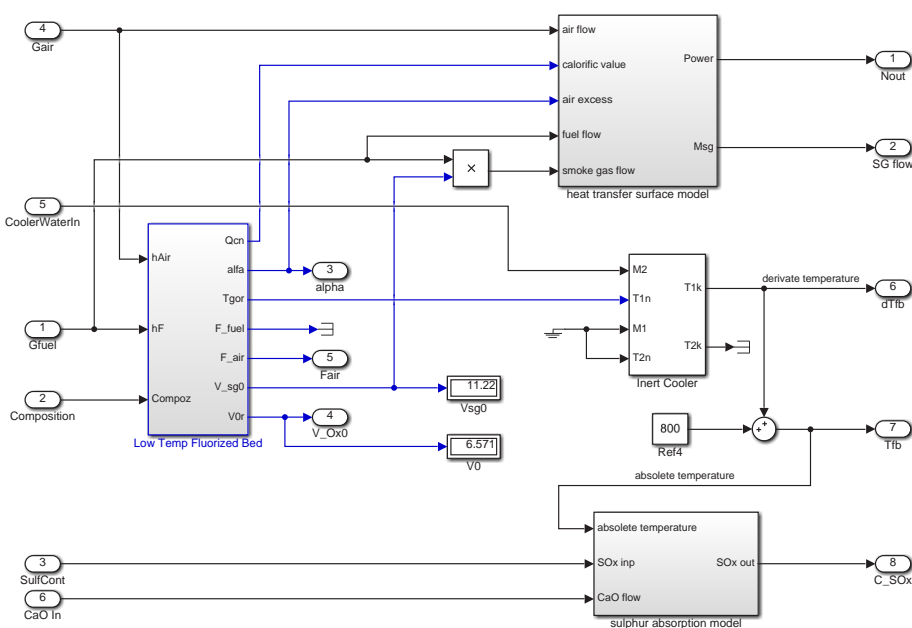


Рис. 6. Структурна схема імітаційної моделі об'єкта керування

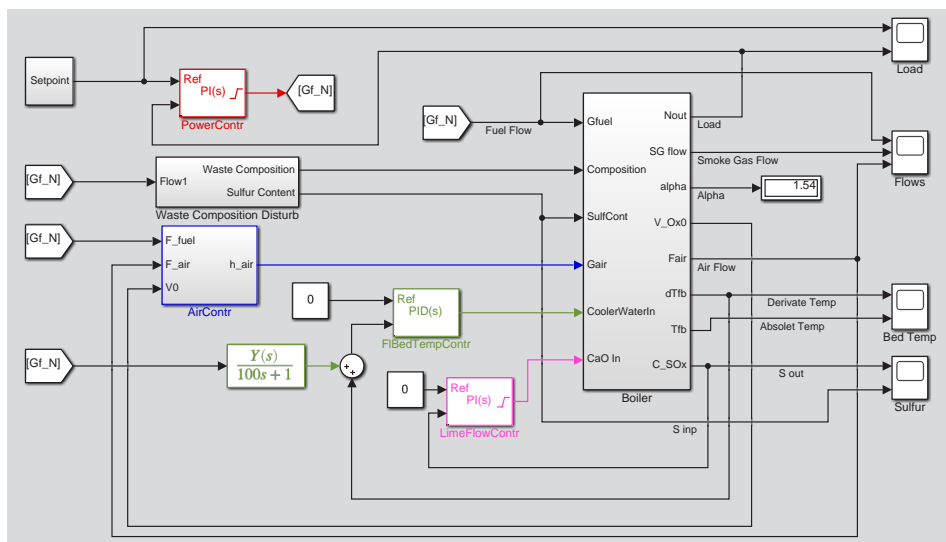


Рис. 7. Схема імітаційної моделі АСК установки спалювання ТБО

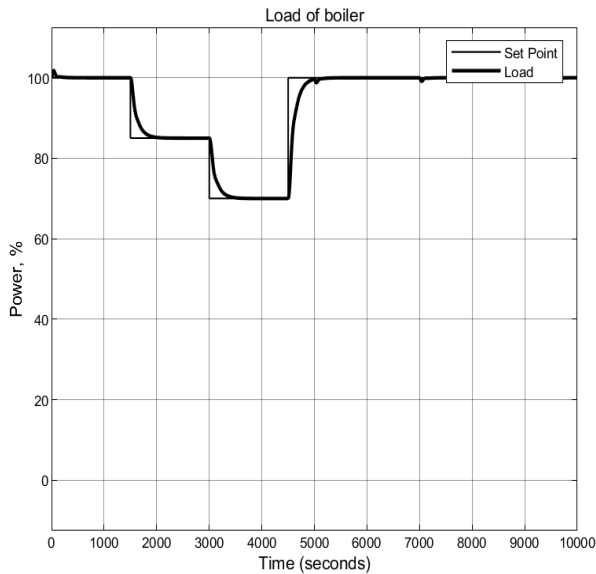


Рис. 8. Графік навантаження установки спалення ТПВ

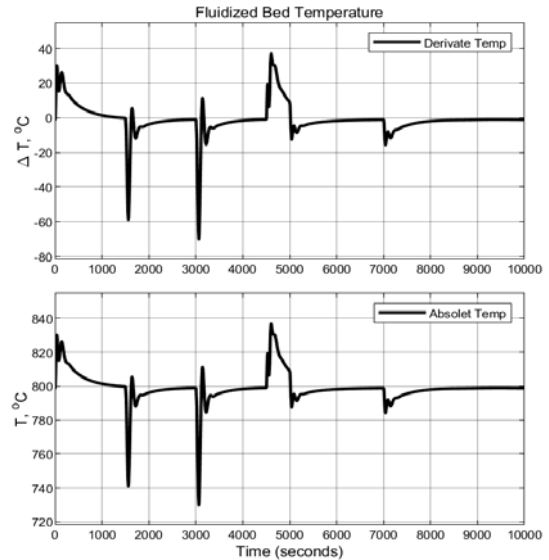


Рис. 9. Перехідний процес регулювання температури киплячого шару

Flows, Bed Temp, Sulfur – блоки виведення графіків (*Score*); *Setpoint* – блок сигналу завдання потужності.

Виходячи з властивостей об'єкта керування за каналами керування висоти киплячого шару, а саме підтримання витрати первинного повітря та відведення шихти (шлаку) не розглядалося. оскільки для підтримання цих параметрів достатньо штатних систем керування.

Обчислювальний експеримент розробленої САК та показники якості регулювання

Пропонована система керування має наступні особливості.

Для компенсації впливу складу паливної суміші (ТПВ) використаний засіб визначення бруто формули палива [21]. Визначення бруто формули паливної суміші дає можливість з випередженням визначити теплотворну здатність палива та визначити теоретичну кількість повітря, яке йде на спалення. Ця інформація подається на регулятор навантаження та регулятор економічності, відповідно. Однак дослідження показали, що топка з ЦКШ має доволі велику інерційність, як за витратою палива так й витратою повітря. Тому було ухвалено рішення залишити сигнал про теплотворну здатність палива тільки для контролю. Таким чином при спаленні ТПВ динамічні характеристики котла визначаються характеристиками топки.

І навпаки, введення сигналу про теоретичну кількість повітря дозволило збільшити точність

підтримання такого складу димових газів, який відповідає мінімальним втратам теплоти від хімічного недопалу та з газами, що відходять. А також за рахунок збільшеної кількості повітря дозволяє зменшити температуру горіння палива в киплячому шарі. Це можна вважати первинним регулюванням температури киплячого шару.

Вторинне регулювання температури шару відбувається за рахунок винесеного трубчастого теплообмінного апарату. Теплообмінні труби занурені у циркулюючу шихту. За рахунок зміни витрати води скрізь цей теплообмінник регулюється температура шихти, що повертається у топку. Така схема регулювання дозволяє підтримувати температуру шихти з більшою точністю у перехідних режимах роботи установки.

Процеси регулювання при нанесенні збурень значенням необхідної потужності та складом паливної суміші, показані на рисунках 8–4.18.

На рисунку 8 наведено зміни завдання навантаження та відповідну зміну значення навантаження установки. Обурення складом паливної суміші повністю компенсуються. Спостерігаються незначні менше ніж 1% відхилення потужності, які повністю компенсуються протягом 2–3 хвилин.

На рисунку 9 представлений перехідний процес регулювання температури киплячого шару. Моменти відхилення температури від номінального значення відповідають моментам зміни потужності (1500, 3000 та 4500 с) та моментам зміни складу паливної суміші (5000 та 7000 с). Система управ-

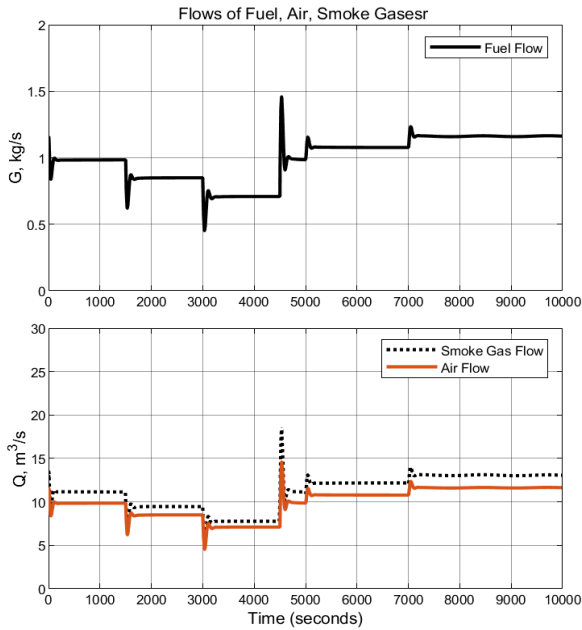


Рис. 10. Графік значень витрат паливної суміші, повітря та димових газів

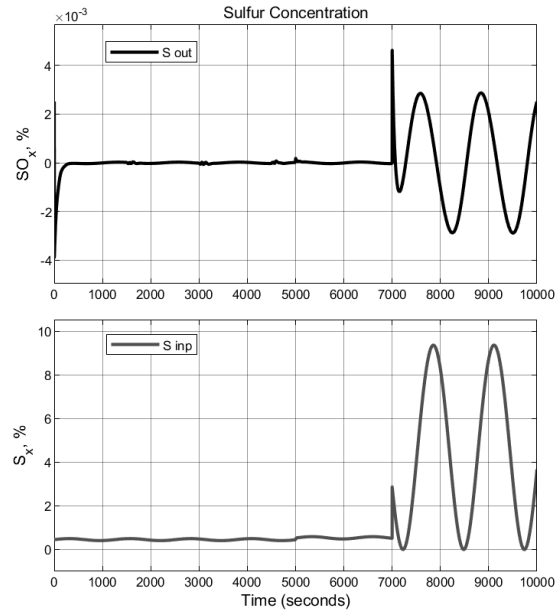


Рис. 11. Графіки перехідного процесу регулювання оксидів сірки

ління задовольняє вимогам щодо підтримки температури киплячого шару. При однаковому збуренні потужністю 15%, але при різних значеннях потужності (рис. 8), величина відхилення температури різна. Це пояснюється нелінійними характеристиками об'єкта керування. Якість управління температурою киплячого шару накладає обмеження величину обурення, яку може компенсувати система управління. З результатів імітаційного моделювання, рекомендовано не перевищувати величину обурення 15% потужності.

На рисунку 10 наведено значення витрат паливної суміші, повітря та димових газів. Відхилення технологічних параметрів перебувають у розрахункових межах. Регулюючі органи переміщуються у робочих діапазонах, без виходу на обмеження.

На рисунку 11 наведено графіки перехідного процесу регулювання оксидів сірки. На верхньому графіку наведено відхилення концентрації SO_x у димових газах. На нижньому графіку – концентрація сірки у початковій сировині, яка подається на спалювання. До моменту часу 7000 с моделювалось типове значення концентрації сірки у ТПВ, на рівні 0,5–0,8% до 5000 с та 1–1,5% від 5000 с до 7000 с. Починаючи з 7000 с було змодельоване вміст сірки у складі ТПВ до 10%. Для типового вмісту сірки концентрація оксиду сірки SO_x у димових газах знаходиться у межах допустимих середньодобових значень 0,05 мг/м³, для значно

збільшеного значення – у межах допустимого разового викиду у 0,5 мг/м³ [1].

Висновки. В якості об'єкта керування для дослідження обрано котел обладнаний топкою з циркулюючим киплячим шаром. Використання ЦКШ дозволяє вирішити задачу регулювання температури шару з метою зменшення викидів шкідливих сполук сірки.

Було проведено декомпозицію установки з виділенням характерних ділянок: топки ЦКШ; винесеного теплообміннику; теплообмінних поверхонь, що нагрівають теплоносій; процес поглинання сполук сірки вапном. Синтезовано математичну модель, яка поєднує окремі математичні ділянки.

Синтезовано автоматизовану систему керування установкою. При цьому означені регульовані технологічні змінні, керуючі впливи. Виділено чотири основних регулятора, а саме потужності, температури шару, економічності, та викидів шкідливих речовин.

Проведено імітаційне моделювання системи. Аналіз перехідних процесів регулювання показав, що система управління задовольняє вимогам щодо підтримки заданого теплового навантаження, задовольняє вимогам щодо підтримки температури киплячого шару. Концентрація оксиду сірки SO_x у димових газах знаходиться в межах допустимих середньодобових значень.

Список літератури:

1. EMEP/EEA air pollutant emission inventory guidebook 2023: Technical guidance to prepare national emission inventories (EMEP/EEA Guidebook). Luxembourg: Publications Office of the European Union, 2023. ISBN 978-92-9480-598-0 ISSN 1977-8449. doi: 10.2800/795737
2. Wang, Y. et al. Review on the catalytic pyrolysis of waste oil for the production of renewable hydrocarbon fuels. *Fuel*, Vol. 283, 2021, 119170. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2020.119170>
3. Annisa, R. et al. Environmental Impact Assessment of Steam Cycle and Combine Cycle Power Plants Using Life Cycle Assessment Methodology. 2018 Conference on Power Engineering and Renewable Energy (ICPERE), Solo, Indonesia, 2018, pp. 1-6, doi: 10.1109/ICPERE.2018.8739338.
4. Alfe, M. et al. The effect of temperature on soot properties in premixed methane flames. *Combustion and Flame*, Vol. 157, 2010, pp. 1959-1965. <https://doi.org/10.1016/j.combustflame.2010.02.007>
5. Davydov, V.O., Bondarenko, A.V. The method of calculating the combustion temperature of any mixture of hydrocarbon fuel for any excess air. *Works of Odessa polytechnic university*, Vol. 3 (42), 2013, Odessa, pp. 98-101. <http://dspace.opu.ua/jspui/handle/123456789/5332>
6. Maksimov, M. V., Brunetkin, A. I., Bondarenko, A. V. Model and method for determining conditional formula hydrocarbon fuel combustion. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, Vol. 6 No. 8(66), 2013, pp. 20-27. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2013.18702>
7. Lysyuk, O.V. Improvement of the heat load control system of a drum boiler for burning combustible artificial gases. *Bulletin of the Kherson National Technical University*, No. 3(62), 2017, pp. 180-185. (in Russian) URL: [http://kntu.net.ua/ukr/content/download/82019/475551/file/%D0%92%D0%86%D0%A1%D0%9D%D0%98%D0%9A%20%E2%84%963\(62\)%20%D0%A2%D0%BE%D0%BC%201.pdf](http://kntu.net.ua/ukr/content/download/82019/475551/file/%D0%92%D0%86%D0%A1%D0%9D%D0%98%D0%9A%20%E2%84%963(62)%20%D0%A2%D0%BE%D0%BC%201.pdf)
8. Dobrovolska, T., Lozhechnikov, V. The automated control system of the burning fuel process with a variable calorific capacity for the refining Industry. *Journal of Automation and Information Sciences*, Vol. 48, 2016, pp. 25-30. DOI:10.1615/JAutomatInfScien.v48.i10.30
9. Dobrovolskaya, T.S., Maksimov, M.V., Lozhechnikov, V.F., Bondarenko, A.V. The mathematical model of non-certified fuel combustion. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, Vol. 2, No. 8(68), 2014, 44-51. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2014.22420>
10. Vovk, I.V., Beglov, K.V. Modeling of water heating boilers with deep disturbances in fuel content. *Scientific notes of the Tavri National University named after V.I. Vernadsky. Series "Technical Sciences"*, Issue 29 (68), No. 6(1), 2018, pp. 116-121. (in Ukrainian) URL: http://www.tech.vernadskyjournals.in.ua/journals/2018/6_2018/part_1/22.pdf
11. Ткаченко, А.Є. Синтез динамічної моделі котельного агрегату низькотемпературного киплячого шару / О.Є. Ткаченка, Б.В. Гавриленко // Автоматизація технологічних об'єктів та процесів. Пошук молодих: Збірник наукових праць XV науково-технічної конференції аспірантів та студентів у м. Донецьку, 20–22 травня 2015. – Донецьк: ДонНТУ, 2015. – С. 195–198.
12. Гавриленко, Б.В. Синтез математичної моделі топки киплячого шару шахтного повітропідігрівача за нестационарних умов для завдань автоматичного управління / Б.В. Гавриленко, С.В. Неєжмаков // Моделювання та інформаційні технології: 36. наук. пр. – К.: ППМЕ ім. Г.Є.Пухова НАН України, 2010. – Вип. 57. – С. 164–173.
13. Рохман Б.Б., Шрайбер А.А., Чернявсьий Н.В. Інженерна методика розрахунку горіння твердих палив у реакторі з циркулюючим киплячим шаром стосовно пілотної установки за технологією фірми "Лургі" // Пром. теплотехніка. – 2004. – т. 26. – № 4. – с. 40–47.
14. Davydov, V.O., Bondarenko, A.V. The method of calculating the combustion temperature of any mixture of hydrocarbon fuel for any excess air. *Works of Odessa polytechnic university*, Vol. 3 (42), 2013, Odessa, pp. 98-101. <http://dspace.opu.ua/jspui/handle/123456789/5332>
15. Беглов, К. В., Козлов, О. В., Кондратенко, Ю. П., Марколенко, Т. Д., Кривда, В. І. «Автоматичне керування тепловою потужністю котла на основі зміни теплоти згоряння вуглеводневого палива», *International Scientific Technical Journal "Problems of Control and Informatics"*, 2023, 68(2), с. 75–92. doi: 10.34229/1028-0979-2023-2-6. (Реєстр наукових фахових видань України, категорія «А»)
16. V.Kryvda, O.Brunetkin, K.Beglov, T.Markolenko, I.Lutsenko (2024) "Method of controlling the volume of combustion products at different boiler loads", *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*. 2024, (1): 100–104. <https://doi.org/10.33271/nvngu/2024-1/100>
17. Вовк І.В., Беглов К.В. Моделювання водогрійних котлів при глибоких збуреннях за змістом палива. *Вчені записки Таврійського національного університету імені В.І. Вернадського. Серія «Технічні науки»*. 2018. Вип. 29 (68). № 6 (1). С. 116–121. URL: https://scholar.google.com.ua/citations?view_op=view_citation&hl=ru&user=c3oVsmkAAAAJ&citation_for_view=c3oVsmkAAAAJ:ZeXyd9-uunAC.
18. Дуба І.Е., Беглов К.В. Моделювання водогрійних котлів при глибоких збуреннях за теплотворною спроможністю палива. *Вчені записки Таврійського національного університету імені В.І. Вернадського. Серія «Технічні науки»*. 2018. Т. 29 (68). № 6 (1). С. 132–136.

19. Winter F. Formation and reduction of pollutants in CFBC: from heavy metals, particulates, alkali, NO_x, N₂O, SO_x, HCl // Proc. of the Intern. Conf. FBC-20. China, Xian, May 18–21, 2009. P. 43–48.

20. NO_x and N₂O emissions of burning coal with high alkali content in a circulating fluidized bed / Yi Cai1, L. Cheng, L. Xu, Q. Wang, M. Feng, Z. Luo, Q. Zhou, L. Nie, H. Su // Proc. of the 22nd Intern. Conf. on FBC. Finland, Turku, June 14–17, 2015. P. 496–503.

21. Патент України на винахід № 120216. Установа для визначення складу горючого газу при його спалюванні / Максимов М.В., Брунеткін О.І., Лисюк О.В., Тарахтій О.С. № а201712785; заявл. 22.12.2017; опубл. 25.10.2019, Бюл. N 20.

Lysyuk H.P. SYNTHESIS OF THE HEAT LOAD CONTROL SYSTEM OF THE DRUM BOILER IN THE COMBUSTION OF SOLID DOMESTIC WASTE

The article examines the topic of thermal disposal of solid household waste in furnaces with a fluidized bed. A feature of the operation of such incinerators is the dramatically changing composition of household waste submitted for processing. Also, a special difference of burning waste is the risk of formation of harmful compounds, such as sulfur dioxides, nitrogen oxides, chlorine compounds, dioxins and furans. To prevent the formation of such compounds, it is very important to maintain the temperature of the fluidized bed.

The purpose of the article is the development and research of a system of automated control of the thermal power of the combustion plant with compensation for load disturbances and changes in fuel composition at any level of thermal power and increasing the efficiency of the combustion process of the fuel mixture regardless of its composition and current power level.

To achieve the goals, mathematical models of burning solid fuel of variable composition in furnaces with a circulating fluidized bed were improved, taking into account the presence of organic compounds in the mixture, which include sulfur.

The mathematical model was divided into the following sections: model of the solid fuel combustion process in a pseudo-liquid layer; model of heat transfer to the working body in radiative and convective heating surfaces; emission model of harmful substances, primarily sulfur oxides.

An automated installation control system has been synthesized. At the same time, the adjustable technological variables controlling the impact are specified. Four main regulators are identified, namely: power, bed temperature, economy and emissions of harmful substances.

It was decided to abandon the introduction of a signal about the calorific value of the fuel into the power regulator, since a sudden change in the flow rate of the fuel mixture can lead to emergency situations. Conversely, entering a signal about the theoretical amount of air allows you to increase the accuracy of maintaining such a composition of flue gases that corresponds to minimal heat losses from chemical underburning and exhaust gases. And also due to the increased amount of air, it is possible to lower the fuel combustion temperature in the fluidized bed.

The improved mathematical model of the dynamics of drum boilers will allow to perform mathematical modeling of the operation of the improved system.

Key words: *thermal utilization, incineration, solid household waste, furnace with a fluidized bed, automated control systems, mathematical model of the dynamics of drum boilers.*

Маринич І.А.

Криворізький національний університет

Макогонов А.В.

Криворізький національний університет

ВИЯВЛЕННЯ БПЛА НА ОСНОВІ ТЕХНОЛОГІЙ МАШИННОГО ЗОРУ

У статті досліджується проблема виявлення та уникнення перешкод для безпілотних літальних апаратів (БПЛА) коптерного типу, зосереджуючи увагу на використанні сучасних методів комп'ютерного зору та глибокого навчання для детекції БПЛА в реальному часі. Щоб коректно керувати рухом БПЛА в автономному режимі, необхідно мати інформацію про точку зльоту, посадки та траєкторію руху. Ці дані, разом із даними навігаційної системи (GPS, інерційний блок), використовуються для створення програми управління. Під час польоту БПЛА можуть зустрічатися перешкоди, які необхідно оминати. Ці перешкоди можна поділити на дві групи: ті, що знаходяться на низькій висоті (будівлі, дерева), та ті, що зустрічаються на стандартній висоті польоту (інші БПЛА, птахи, літаки). Ця робота зосереджена на виявленні перешкод другої групи, а саме коптерних БПЛА, які зазвичай мають найменші розміри, що ускладнює їх розпізнавання. Оскільки перешкоди на стандартних висотах польоту, такі як інші дрони, є складними для виявлення, особливо через їхні невеликі розміри та схожість з фоном, у роботі розглядаються сучасні нейромережеві архітектури, включаючи YOLOv10, YOLO-NAS, RT-DETR та інші.

Проведено аналіз датасетів, зокрема DUT Anti-UAV Detection and Tracking, які використовуються для навчання моделей. В статті оцінюється продуктивність зазначених моделей на основі точності виявлення, швидкості та обчислювальних витрат, з метою адаптації їх до умов реального часу для вирішення завдань протидії БПЛА. У роботі також розглянуто можливості оптимізації існуючих моделей, зокрема шляхом зменшення кількості параметрів моделей та використання переднавчених мереж, що дозволяє підвищити швидкодію без втрати точності. Запропоновані методи оптимізації можуть бути застосовані для реальних систем виявлення БПЛА в умовах обмежених обчислювальних ресурсів

Результати досліджень демонструють, що поєднання сучасних методів обробки зображень і алгоритмів глибокого навчання є ефективним підходом до автоматизованого управління БПЛА та уникнення перешкод.

Ключові слова: виявлення БПЛА, машинний зір, нейронні мережі, автоматизація, YOLO, RT-DETR.

Постановка проблеми. Для коректного управління рухом безпілотного літального апарата в автономному режимі необхідно мати точку взлету, точку посадки, та траєкторію. На основі цих даних, а також даних, отриманих від системи навігації (GPS, інерційний блок) можна розробити програму, яка буде керувати машиною. Але необхідно враховувати, що під час польоту можуть зустрічатися різні перешкоди, які необхідно обминати. Вважаємо, що їх можна розділити на дві великі групи:

1) перешкоди, які зустрічаються на невеликій висоті (будівлі, дерева, тощо);

2) перешкоди, які будуть зустрічатися на стандартній висоті польоту (інші бпла, птахи, літаки, гвинтокрили).

Ця робота зосереджена на виявленні другої групи. І першим типом перешкоди для виявлення

було вирішено взяти БПЛА коптерного типу, так як зазвичай вони мають найменші розміри, і, відповідно важчі для розпізнавання. Згідно [1] в системах детекції можна використовувати різні типи сенсорів:

- радары
- електро-оптичні/теплові
- акустичні
- радіочастотні
- людське спостереження.

Неавтоматичні системи, до складу яких входять кінцеві користувачі, які відстежують і підтверджують класифікаційну мітку виявленої цілі, як правило, мають найкращі характеристики щодо можливостей класифікації, але, як правило, мають високі експлуатаційні витрати через навчання персоналу та обслуговування системи. Як електрооптичні, так і тепловізійні камери пропонують

високі можливості класифікації з точною локалізацією та визначенням дальності, коли використовується кілька датчиків. Електрооптичні камери, як правило, дешеві, хоча теплові камери дорожчі, але обидві вони чутливі до параметрів навколишнього середовища. З іншого боку, акустичні датчики, як правило, стійкі до умов навколишнього середовища, але їх обмежений ефективний діапазон робить їх менш поширеним варіантом. Нарешті, радіолокаційні датчики є найпоширенішим рішенням для частини виявлення через точну локалізацію та велику дальність у поєднанні з гідними можливостями класифікації, які працюють незалежно від налаштувань середовища [1]. Однак виявлення дронів за допомогою систем, розроблених для літаків, не є простим, оскільки вони часто використовують методи зменшення небажаного відлуння від невеликих, повільних і низько літаючих об'єктів, що є саме тим, що характеризує дрони [2]. Також необхідно врахувати, що додаткове обладнання збільшує вагу, вартість та відповідно енергоспоживання безпілотного літального апарату. Тому локалізація об'єктів за допомогою вбудованої камери і бортового комп'ютера виглядає перспективним напрямом автоматизації управління БПЛА.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. За останні роки сильно розширилися можливості застосування технологій машинного навчання для виявлення об'єктів на зображеннях. Прикладами можуть слугувати моделі сімейства You Only Look Once (YOLO), REGION-BASED CONVOLUTIONAL NEURAL NETWORKS (RCNN), FAST R-CNN, FASTER R-CNN, MASK R-CNN, DETR [3] та інші. В статті [3] приводиться великий порівняльний аналіз цих мереж на датасетах PASCAL VOC 2007, PASCAL VOC 2012, and Microsoft COCO по точності визначення об'єктів на картинках. Але контексті розпізнавання в реальному часі не менш важливими характеристиками є швидкість відповідей, а також кількість ресурсів необхідних для роботи нейромережі (оперативна пам'ять, потужність процесора, кількість дискового простору). В цьому контексті можна відзначити, що RCNN та Fast R-CNN мають доволі повільну швидкість визначення – 40 та 2 секунди відповідно [4]. В той же час Faster R-CNN визначає об'єкт за 0.2 секунди [4]. Багато останніх детекторів на основі глибокого навчання хоч і показують переконливу продуктивність для виявлення великих об'єктів у різноманітних ситуаціях в режимі реального часу. Однак виявлення невеликих об'єктів є складним

завданням через складну природу таких об'єктів. Крім того, складність, присутня на кількох зображеннях через існування дисбалансу переднього/заднього плану та спотворення перспективи, спричинене несприятливою погодою та умовами слабого освітлення, ускладнює точне виявлення малих об'єктів [5].

Проблема виявлення об'єкта визначається шляхом визначення положення об'єкта на заданому зображенні (локалізація об'єкта) і класу, до якого належить кожен об'єкт (класифікація об'єкта). Алгоритми виявлення об'єктів на основі глибокого навчання поділяються на дві основні категорії. Перший клас – це двоетапні алгоритми виявлення об'єктів, типовими для яких є Fast R-CNN, Faster R-CNN, Mask R-CNN та інші. Іншим класом є одноетапні алгоритми виявлення об'єктів, типовими для яких є такі алгоритми, як SSD (Liu et al., 2016), YOLOv3 (Redmon & Farhadi, 2018) і YOLOv4 (Bochkovskiy et al., 2020). Одноступінчастий алгоритм виявлення об'єктів має наскрізні переваги в продуктивності, але є низькою з точки зору точності виявлення порівняно з двоступеневим. Двоетапний алгоритм виявлення об'єктів використовує підхід локалізації з подальшим розпізнаванням, що є кращим, ніж одноетапний з точки зору точності виявлення, але він має нижчу продуктивність у реальному часі [6].

Проте ці базові методи не працюють належним чином при безпосередньому застосуванні до БПЛА виявлення та відстеження. Навіть незважаючи на наявність алгоритмів виявлення, які поступово стають зрілими та комерціалізованими, виявлення малих об'єктів в складному фоні все ще є проблемою. БПЛА часто зливається з складним фоном, з великим шумом і перешкодами [7].

Основною метою роботи [7] було використання існуючих найсучасніших методів виявлення та відстеження для ефективної адаптації та вирішення завдання проти БПЛА на рівні даних і методів. Методи, засновані на глибокому навчанні, вимагають тривалого навчання даних для отримання надійної та точної продуктивності. Тому було запропоновано набір даних у видимому світлі для БПЛА, в тому числі підмножини виявлення та відстеження. Також було перенавчено кілька методів виявлення за допомогою цього навчального набору. В якості методів виявлення було використано Faster-RCNN, Cascade-RCNN і ATSS, які є двоетапними методами, та YOLOX та SSD, які є одноетапними методами.

Такий самий набір даних було використано і в роботі [8]. Автори використовують розши-

рення ефективного рецептивного поля (ERF – Effective Receptive Field) – карт ознак, згенерованих з основи YOLOv6. RepLKNet використовується як основа YOLOv6, яка розгортає великі ядра з глибокою згортою. Відтак, щоб подолати тривалий час виведення RepLKNet, впроваджується новаторська мережа LERFNet. LERFNet використовує розширену згортку на додаток до великих ядер, щоб збільшити ERF і подолати проблеми один одного. Лінійний модуль уваги просторового каналу (LAM) використовується, щоб приділити більше уваги найбільш інформативним пікселям і високофункціональним каналам. LERFNet генерує вихідні карти ознак із великим ефективним рецептивним полем та високим упередженням форми, щоб покращити виявлення дронів різних розмірів у складних сценах. Порівнюються бази RepLKNet і LERFNet для Tiny-YOLOv6, Tiny-YOLOv6, YOLOv5s і Tiny-YOLOv7. У порівнянні з вищезгаданими методами, результати запропонованої моделі демонструють більший баланс між точністю та швидкістю. LERFNet збільшує MAP на 2,8%, водночас значно зменшуючи GFLOP та кількість параметрів у порівнянні з оригінальною основою YOLOv6.

В роботі [9] базуючись на аналізі попередніх робіт, пропонують, що для відстеження БПЛА важливо об'єднати інформацію з видимих зображень RGB та ІЧ. Тому було представлено новий набір даних, Anti-UAV, щоб полегшити дослідження відстеження БПЛА. Anti-UAV містить високоякісні відеоряди високої чіткості як RGB, так і ІЧ. Кожна послідовність анована обмежувальними рамками, атрибутами та прапорцями, які вказують на існування цільового об'єкта. Варто зазначити, що в Anti-UAV відеоряди RGB та ІЧ об'єднані в пару. Таким чином, запропонований набір даних підтримує як одномодальне, так і мультимодальне відстеження БПЛА.

Постановка завдання. У роботі потрібно дослідити сучасні неймережі виявлення БПЛА

використовуючи наявні датасети DUT Anti-UAV Detection and Tracking [11] та розглянути можливості оптимізації існуючих моделей, зокрема шляхом зменшення кількості параметрів моделей та використання переднавчених мереж, що дозволяє підвищити швидкодію без втрати точності.

Виклад основного матеріалу. Датасет DUT Anti-UAV Detection and Tracking містить загалом 10 000 зображень, у яких набори для навчання, тестування та перевірки містять 5200, 2200 та 2600 зображень відповідно. З огляду на ситуацію, що одне зображення містить кілька об'єктів, загальна кількість виявлення об'єктів становить 10109, де проводиться навчання, тестування та перевірка набори мають 5243, 2245 і 2621 об'єктів відповідно [7]. Набір даних містить зображення з різними розширеннями. Найбільше зображення має розмір 3744px і 5616px, тоді як розмір найменшого зображення складає 160×240.

Балансуючи між різноманітністю предметів і запобіганню надмірного ряду моделей, в ньому представлено більше 35 типи БПЛА. Інформація про задній фон в наборі даних також різноманітна. Враховуючи, що БПЛА здебільшого літають на відкритому повітрі, фоном є зовнішнє середовище, включаючи небо, темні хмари, багатопверхівки, житлові будинки, сільськогосподарські угіддя, та дитячі майданчики. Крім того, враховано різні умови освітлення (наприклад день, ніч, світанок і сутінки), а також різна погода (наприклад, сонячний, хмарний і сніжний день).

Найчастіше розміри БПЛА малі і займають невелику частку на зображенні. Тому у цьому наборі об'єкти, які показані крупним планом займають не значну кількість (приклади наведені на рисунку 1).

Середнє співвідношення площі об'єкта до загального розміру зображення становить приблизно 0,013, найменший коефіцієнт площі об'єкта становить 1,9e-06, а найбільший об'єкт займає 0,7

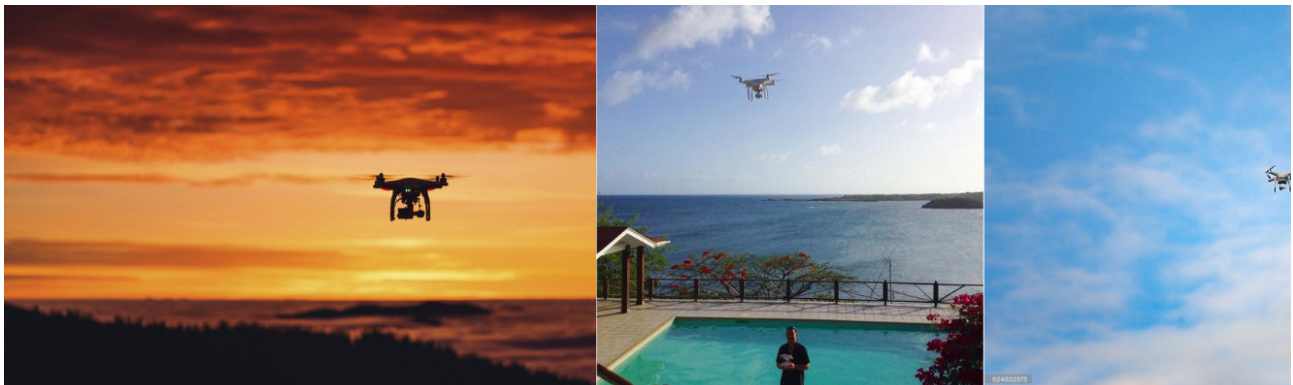


Рис. 1. Приклади зображень з набору даних

від усього зображення. Більшість об'єктів зосереджено в центрі зображення. Діапазон руху об'єктів у всіх наборах різний, а горизонтальні та вертикальні переміщення об'єктів розподілені рівномірно. Для набору даних відстеження обмежувальні рамки об'єкта в одній послідовності є безперервними. Окрім центральної області зображення, об'єкти також часто рухаються праворуч і нижньо-ліворуч від зображення [7].

Для навчання були обрані різні сучасні моделі. У [12] розробники націлюючись як на постобробку, так і на архітектуру моделі під час виявлення розробили сімейство моделей YOLOv10. З цією метою спочатку було вирішено проблему надлишкових прогнозів у постобробці шляхом представлення послідовної стратегії подвійних призначень для YOLO без NMS з подвійною міткою призначення та узгоджену метрику відповідності. Це дозволяє усунути потребу в NMS під час виводу (аналізу нових даних), що призводить до конкурентоспроможності з високою ефективністю. По-друге, запропоновано цілісну ефективну керувану стратегію проектування моделі для архітектури моделі шляхом виконання всебічної перевірки для різних компонентів YOLO. Для підвищення ефективності розроблено легку класифікаційну головку, просторово-каналне роз'єднане зменшення розмірності та конструкцію блоків з урахуванням рангу, щоб зменшити виявлену обчислювальну надлишковість та досягти більш ефективної архітектури. Для підвищення точності досліджено згортку з великим ядром і представлено ефективний модуль часткової самоуваги для посилення можливостей моделі, використовуючи потенціал для покращення продуктивності за низьких витрат [12].

Наступною моделлю є YOLO-NAS, яка була випущена у травні 2023 року компанією Deci, яка розробляє моделі та інструменти для створення, оптимізації та розгортання моделей глибокого навчання. YOLO-NAS призначена для виявлення дрібних об'єктів, покращення точності локалізації і підвищення співвідношення продуктивності на обчислювальну машину, що робить її придатною для додатків периферійних пристроїв у режимі реального часу. Крім того, її архітектура з відкритим кодом доступна для дослідницького використання.

Особливостями YOLO-NAS [13] є:

- Модулі з урахуванням квантизації [125], названі QSP та QCI, які поєднують репараметризацію для 8-бітної квантизації, щоб мінімізувати втрату точності під час пост-тренувальної квантизації.

- Автоматичне проектування архітектури за допомогою AutoNAS, власної технології NAS компанії Deci.

- Метод гібридної квантизації для вибіркової квантизації певних частин моделі з метою балансування затримки та точності замість стандартної квантизації, де впливу зазнають усі шари.

- Режим попереднього навчання з автоматично розміченими даними, самодистиляцією та великими наборами даних.

Також останнім часом почала набирати популярність нова архітектура розпізнавання заснована на трансформерах – DETR (Detection Transformer). Вивчаючи дані статті [3] можна дійти висновку, що вони не мають ще достатньої точності, та не можуть бути застосовані для обробки даних у форматі реального часу. Тому автори [14] створили Real-Time DEtection TRansformer (RT-DETR) – перший наскрізний детектор об'єктів у реальному часі. В той час як, YOLO зазвичай вимагають немаксимального придушення (NMS) для постобробки, яка не тільки сповільнює швидкість висновку, але також вводить гіперпараметри, які спричиняють нестабільність як швидкості, так і точності. Крім того, враховуючи те, що різні сценарії роблять різний акцент на запам'ятовуванні та точності, необхідно ретельно вибирати відповідні порогові значення NMS, що перешкоджає розробці детекторів реального часу. DETR напротивагу забезпечує альтернативний підхід:

- Біективне співставлення: DETR створює фіксовану кількість прогнозів і використовує біективне співставлення між прогнозами та істинними об'єктами.

- Навчання end-to-end: Модель навчається безпосередньо видавати унікальні прогнози без потреби в пост-обробці.

- Self-attention механізми: Використовуються для неявного моделювання відносин між об'єктами.

Як результат набір унікальних детекцій видається без застосування NMS. Для зниження обчислювальних витрат цей підхід у [7] був покращений за допомогою ефективного гібридного кодера, щоб замінити кодер Vanilla Transformer, який значно покращує швидкість логічного висновку шляхом роз'єднання внутрішньомасштабної взаємодії та крос-масштабного злиття функцій із різними масштабами. Щоб уникнути вибору функцій кодера з низькою достовірністю локалізації як об'єктних запитів, запропоновано вибір запиту з мінімальною невизначеністю, який забезпечує

високоякісні початкові запити до декодера шляхом явної оптимізації невизначеності, тим самим підвищуючи точність. Крім того, завдяки багаторівневій архітектурі декодера DETR RT-DETR підтримує гнучке налаштування швидкості для адаптації до різних сценаріїв у реальному часі без повторного навчання.

Базуючись на попередніх роботах з цим набором даних та на огляді сучасних рішень для тестування були відібрані декілька архітектур. Їх назви та параметри наведені у таблиці 1. Всі параметри отримані при входних зображеннях 640x640px, batch_size =16 за допомогою стандартних функцій фреймворка Ultralytics, за виключенням YOLO-NAS-l (використано бібліотеку thor, тому що стандарта функція фреймворку віддавала значення 0).

Для тренування моделей використовувались інстанси, наведені у таблиці 2.

Приклад однієї з навчальних партій (training batch), яка була використана моделлю YOLOv10s під час тренування наведена на рисунку 2.

Всі моделі проходили цикл тренування у 100 епох. Метриками при тренування моделей YOLO є:

Таблиця 1

Оціночна складність моделей

Назва моделі	Кількість шарів	Кількість параметрів	GFLOPs
YOLOv10n	385	2,775,520	8.7
YOLOv10s	402	8,128,272	25.1
YOLOv10m	498	16,576,768	64.5
YOLOv10l	628	25,888,688	127.9
YOLOv10x	688	31,808,960	171.8
YOLO-NAS-l	719	19,053,888	17.52
RT-DETR Large	673	32,970,476	108.3

Таблиця 2

Параметри серверів для тренування

GPU	Об'єм оперативної пам'яті GPU, Гб	Потужність GPU, TFLOPS	Процесор	Треновані моделі
RTX A4000	16	20.6	Pentium Gold G6400	YOLOv10n, YOLOv10s, YOLOv10m, YOLO-NAS-l
RTX 3090	24	35.3	Core i9-10900X	YOLOv10x, RT-DETR Large



Рис. 2. Приклад training batch для моделі YOLOv10s

- train/box_loss: Втрати при передбаченні обмежувальних рамок (bounding boxes) на тренувальному наборі даних.
- train/cls_loss: Втрати при класифікації об'єктів на тренувальному наборі даних.
- train/df_l_loss: Втрати функції розподілу (Distribution Focal Loss) на тренувальному наборі. Це специфічна втрата, що використовується в деяких версіях YOLO для покращення точності локалізації об'єктів.
- metrics/precision(B): Точність моделі на валідаційному наборі даних. Показує, яка частка передбачених позитивних результатів є дійсно позитивними.
- metrics/recall(B): Повнота моделі на валідаційному наборі даних. Показує, яка частка фактичних позитивних результатів була правильно ідентифікована.
- metrics/mAP50(B): Середня точність (mean Average Precision) при порозі IoU (Intersection over Union) 0.5 на валідаційному наборі.
- metrics/mAP50-95(B): Середня точність, усереднена по різних порогах IoU від 0.5 до 0.95 з кроком 0.05.
- val/box_loss: Втрати при передбаченні обмежувальних рамок на валідаційному наборі даних.
- val/cls_loss: Втрати при класифікації об'єктів на валідаційному наборі даних.
- val/df_l_loss: Втрати функції розподілу на валідаційному наборі.

- lr/pg0, lr/pg1, lr/pg2: Швидкості навчання (learning rates) для різних груп параметрів моделі.

Графічно показники цих метрик це представлені на рисунку 3.

Як видно з графіків основна метрика mAP50 згладжується при наближенні до 100 епохи навчання. При цьому train/box_loss демонструє потенціал до подальшого зменшення, але враховуючи також вирівнювання val/box_loss можна зробити висновок, що збільшення кількості епох може призвести до перенавчання моделі на тренувальному наборі даних.

Модель з трансформерами значно раніше і більш жорстко випрамляє графік (рисунок 4). Тобто можна зробити висновок, що їй треба менше епох для навчання на тому ж самому наборі даних.

Результати розпізнавання об'єктів на валідаційному наборі даних приведено на рисунку 5.

Тестування здійснювалося на сервері Linux з параметрами: 4 ядра процесора AMD EPYC 7282 (загалом ця модель має 16 ядер) та 6 Гб оперативної пам'яті. Тобто на відміну від попередніх робіт, де для перевірки швидкості роботи використовувалися GPU, було обрано конфігурацію без графічного процесора. Яка наближена до конфігурації міні комп'ютера (наприклад Raspberry PI 5).

У таблиці 3 наведені найголовніші метрики для нейромереж, які визначають об'єкти на зображеннях – mAP50 та mAP50-95, а також швидкість обробки.

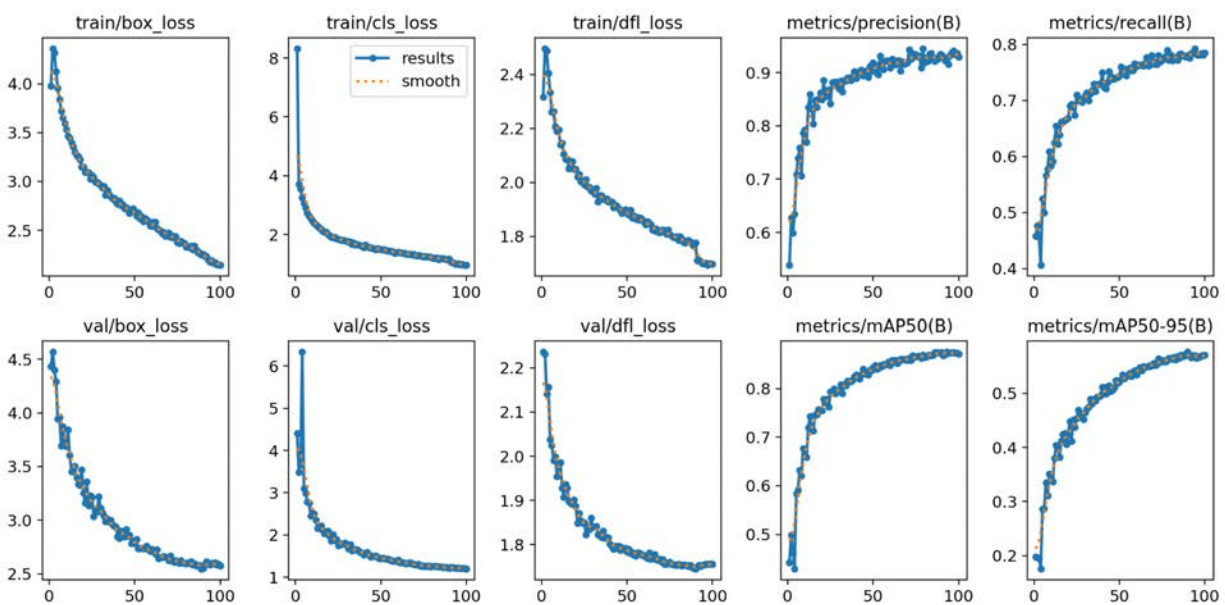


Рис. 3. Графічне відображення метрик навчання для моделі YOLOv10s

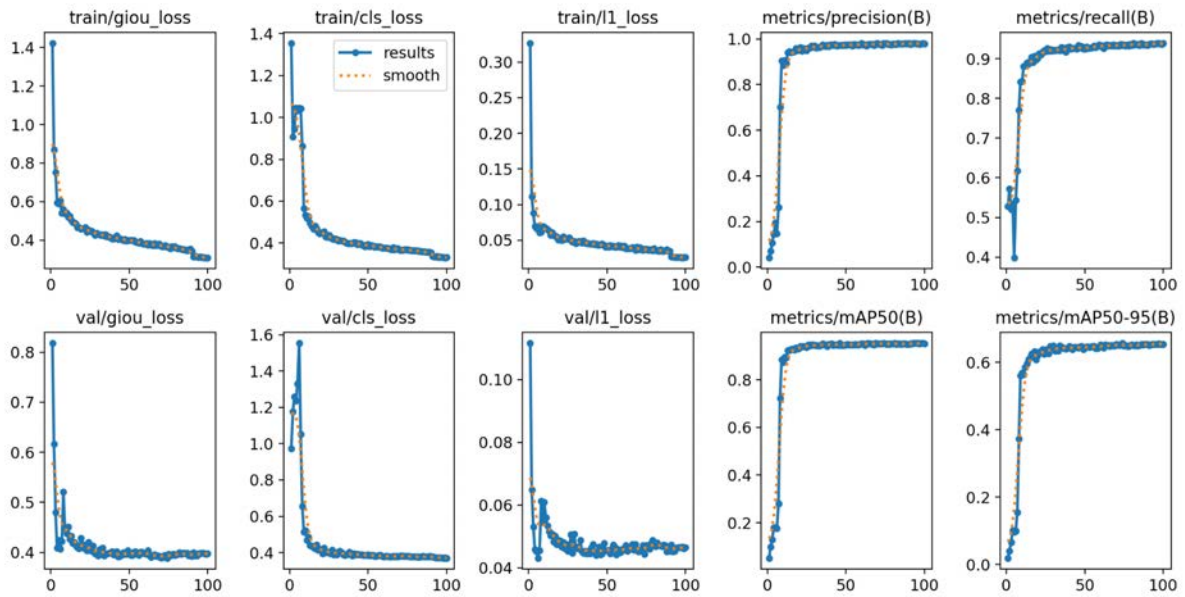


Рис. 4. Графічне відображення метрик навчання для моделі RT-DETR Large



Рис. 5. Приклад розпізнавання БПЛА на валідаційному наборі даних для моделі YOLOv10s

Так як робота націлена на вивчення можливостей використання моделей машинного навчання безпосередньо на борту БПЛА, де скоріш за все не буде встановлена відеокарта.

Останні 3 результати були відібрані з робіт [7] та [8], як найкращі результати. Слід зауважити, що тестування YOLOv6 RepLKNet та YOLOv6 LERFNet відбувалося на інстансі GPU (NVIDIA Quadro M 2000 M) з 4 Гб вбудованої пам'яті. На рахунок Cascade-RCNN не зазначено на якій конфігурації відбувалося тестування. Але в даному

випадку це не є принципово, так як у порівнянні з іншими моделями вона має малу mAP50. Найвищу точність має модель RT-DETR, але, як і очікувалося вона має і найбільшу вартість обчислення. Також можна зробити висновок, що збільшення моделей YOLO не несе сильного приросту у mAP50, але в той же час значно може збільшуватися час на обробку. Вважаємо, що конкурентним вибором у межах малого обчислювального ресурсу доречним буде використання моделі YOLOv10n. При збільшенні потужності, або

Результати навчання моделей на користувацькому наборі даних та їх порівняння до попередніх робіт з цим же датасетом

Модель	mAP50	mAP50-95	Швидкість відповідей, ms	Кадрів в секунду
YOLOv10n	0.902	0.6	58.2	17.18
YOLOv10s	0.919	0.642	122.7	8.15
YOLOv10m	0.92	0.643	304.5	3.28
YOLOv10l	0.92	0.647	528.8	1.89
YOLOv10x	0.929	0.662	807	1.24
YOLO-NAS-l	0.571	0.404	422.5	2.37
RT-DETR Large	0.973	0.717	889.6	1.12
Cascade-RCNN	0.683	-	18.62	53.7
YOLOv6 RepLKNet	93.8%	58.6%	39.20	25.51
YOLOv6 LERFNet	93.5%	58.3%	17.71	56.46

винесенні його на окремий сервер, також варто розглядати варіант з застосуванням RT-DETR.

Висновки. В статті було розглянуто сучасні неймерджі для виявлення об'єктів типу БПЛА квадрокоптерного типу на основі датасету DUT Anti-UAV Detection and Tracking. Також проведено їх навчання та подальше тестування на цьому датасеті і середовищі з обмеженими обчислювальними ресурсами. Додатко було відібрано декілька попередніх робіт з цим датасетом, для того, щоб можна

було впевнитися у точності застосування новий моделей для визначення об'єктів. Найбільш точною виявилася архітектура RT-DETR, запропонована у [14], а найбільш швидкою YOLOv10n (так як вона найлегша з точки зору кількості параметрів). Тому на поточний стан можна обирати ці дві моделі для подальших досліджень, але спираючись на доступні потужності з обчислення. Також в подальшому для виявлення перешкод у повітряному просторі варто збільшувати кількість класів об'єктів.

Список літератури:

1. S. Samaras, E. Diamantidou, D. Ataloglou, N. Sakellariou, A. Vafeiadis, V. Magoulitanis, A. Lalas, A. Dimou, D. Zarpalas, K. Votis, P. Daras, D. Tzovaras. Deep Learning on Multi Sensor Data for Counter UAV Applications – A Systematic Review. *Sensors*. 2019. *Sensors*. Vol. 19. № 22. P. 4837-4872. DOI:10.3390/s19224837.
2. F. Svanström, C. Englund, F. Alonso-Fernandez. Real-Time Drone Detection and Tracking With Visible, Thermal and Acoustic Sensors. *Proc. Intl Conf on Pattern Recognition, ICPR*. (Milan, Italy, 10-15 January 2021). P. 7265-7272. DOI: 10.48550/arXiv.2007.07396
3. A. B. Amjoud, M. Amrouch. Object Detection Using Deep Learning, CNNs and Vision Transformers: A Review. *IEEE Access*. 2023. Vol. 11. P. 35479-35516. DOI: 10.1109/ACCESS.2023.3266093.
4. W. Kadhim, Dr. Mohammed, A. Taha. Object Detection Techniques: A Review. *Wasit Journal of Computer and Mathematics Science*. 2023. № 3. P. 59-68. DOI:10.31185/wjcms.165
5. B. Mahaur, K.K. Mishra. Small-object detection based on YOLOv5 in autonomous driving systems. *Pattern Recognition Letters*. 2023. Vol. 168. P. 115-122. DOI: 10.1016/j.patrec.2023.03.009
6. T. Gao, M. Wushouer, G. Tuerhong. Small Object Detection Method based on Improved YOLOv5" *International Conference on Virtual Reality, Human-Computer Interaction and Artificial Intelligence (VRHCIAI)*, Changsha, China. 2022. P. 144-149. DOI: 10.1109/VRHCIAI57205.2022.00032.
7. J. Zhao, J. Zhang, D. Li, D. Wang. Vision-Based Anti-UAV Detection and Tracking. *Transactions on Intelligent Transportation Systems*. 2022. Vol. 23, № 12. P. 25323-25334. DOI: 10.1109/TITS.2022.3177627.
8. M. Elsayed, M. Reda, A. S. Mashaly, A. S. Ameen. LERFNet: an enlarged effective receptive field backbone network for enhancing visual drone detection. *The Visual Computer*. 2024. DOI: 10.1007/s00371-024-03527-8
9. N. Jiang. Anti-UAV: A Large-Scale Benchmark for Vision-Based UAV Tracking. *Transactions on Multimedia*. 2023. Vol. 25. P. 486-500. DOI: 10.1109/TMM.2021.3128047.
11. J. Zhao. DUT Anti-UAV Detection and Tracking. URL: <https://github.com/wangdongdut/DUT-Anti-UAV> (дата звернення 15.09.2024).
12. A. Wang, H. Chen, L. Liu, K. Chen, Z. Lin, J. Han, G Ding. Yolov10: Real-time end-to-end object detection. *arXiv* 2024. DOI:arXiv:2405.14458
13. J. Terven, D. Cordova-Esparza. A Comprehensive Review of YOLO Architectures in Computer Vision: From YOLOv1 to YOLOv8 and YOLO-NAS. *Mach. Learn. Knowl. Extr.* 2023. Vol. 5. P. 1680-1716. DOI: 10.3390/make5040083

14. Y. Zhao, W. Lv, S. Xu, J. Wei, G. Wang, Q. Dang, Y. Liu, J. Chen. DETRs Beat YOLOs on Real-time Object Detection. Proceedings of the IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR). (Seattle WA, USA, 17-21 червня, 2024). 2024. P. 16965-16974. DOI:10.48550/arXiv.2405.14458

Marynych I.A., Makohonov A.V. DETECTION OF UAVS USING MACHINE VISION TECHNOLOGIES

The article explores the problem of detecting and avoiding obstacles for unmanned aerial vehicles (UAVs) of the copter type, focusing on the use of modern computer vision and deep learning methods for real-time UAV detection. To effectively manage the movement of a UAV in autonomous mode, information about the take-off point, landing point, and flight trajectory is essential. This data, along with navigation system data (GPS, inertial sensors), is used to create the control program. During flight, UAVs may encounter obstacles that need to be avoided. These obstacles can be divided into two groups: those at low altitudes (buildings, trees) and those encountered at standard flight altitudes (other UAVs, birds, airplanes). This work focuses on detecting obstacles of the second group, specifically copter UAVs, which are usually smaller in size, making them more difficult to recognize.

Since obstacles at standard flight altitudes, such as other drones, are challenging to detect, particularly due to their small size and similarity to the background, the paper examines modern neural network architectures, including YOLOv10, YOLO-NAS, RT-DETR, and others. The analysis includes datasets, such as the DUT Anti-UAV Detection and Tracking, used to train models. The paper evaluates the performance of these models based on detection accuracy, speed, and computational cost, aiming to adapt them to real-time conditions in UAV countermeasures. The work also explores optimization possibilities for existing models, such as reducing the number of model parameters and using pre-trained networks, which enhances performance without compromising accuracy. The proposed optimization methods can be applied to real-world UAV detection systems with limited computational resources.

The research results demonstrate that the combination of modern image processing methods and deep learning algorithms is an effective approach to automated UAV management and obstacle avoidance.

Key words: UAV detection, machine vision, neural networks, automation, YOLO, RT-DETR.

УДК 004.4

DOI <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2024.5.1/29>

Мельниченко Д.В.

Державний університет «Житомирська політехніка»

Вакалюк Т.А.

Державний університет «Житомирська політехніка»

Фаррахов О.В.

Центр інформаційно-аналітичного та технічного забезпечення моніторингу об'єктів атомної енергетики Національної академії наук України

Кот Н.С.

Комунальний заклад загальної середньої освіти «Ліцей 5» Хмельницької міської ради

АНАЛІЗ ЗАСОБІВ РЕАЛІЗАЦІЇ ВЕБЗАСТОСУНКУ ДЛЯ КЕРУВАННЯ РОБОЧИМ ЧАСОМ

У статті проведено дослідження напрямків використання інформаційних технологій для реалізації вебсистеми управління персоналом, було досліджено усі важливі аспекти початкового планування вебсистеми та участі інформаційних технологій в них. Розробка вебзастосунок для управління робочим часом з елементами системи управління персоналом дозволить автоматизувати рутинні завдання, пов'язані з плануванням та обліком робочого часу, а також з управлінням персоналом. Для виконання поставлених завдань в повній мірі потрібно створити гнучку і здатну до розширення архітектуру проекту, яка забезпечить стабільне і надійне виконання поставлених завдань. Авторами було проведено детальну роботу для постановки завдання розробки. Під час виконання цієї частини роботи було визначено тип вебсистеми, її мету, її масштаби і детальні кроки для досягнення бажаного результату. Проведено важливу роботу із визначення архітектури вебсистеми. При цьому проаналізовано різні можливі варіанти архітектури, наведено їх можливості. Прийнято рішення зупинитися на використанні вебтехнологій для досягнення найкращих результатів. Було обрано використовувати клієнт-серверну архітектуру для розподілення функцій системи. Проведено аналіз монолітної, N-шарової та мікросервісної архітектури для серверної частини вебсервісу. В результаті проведеного дослідження було прийнято рішення використовувати N-шарову архітектуру як рішення збалансоване між технічними перевагами та економією ресурсів. Також було проведено детальний аналіз можливих варіантів клієнтської архітектури, внаслідок чого прийнято рішення використовувати концепцію реактивного програмування, архітектури Flux та методологію Re-ducks для клієнтської бізнес-логіки. Було обрано та обґрунтовано цей вибір інструментальних засобів для реалізації вебсистеми із урахуванням усіх бізнес-вимог проекту та обраних архітектурних рішень.

Ключові слова: засоби реалізації, застосунок для керування робочим часом, архітектура, N-шарова архітектура, реактивне програмування.

Постановка проблеми. В сучасному світі наявність програмних продуктів у будь-яких сферах діяльності значно покращує умови роботи та ефективність процесів. Це твердження справедливе і для інструментів, які допомагають компаніям легше виконувати роботу із управління персоналом.

Розробка вебзастосунок для управління робочим часом з елементами системи управління персоналом дозволить автоматизувати рутинні завдання, пов'язані з плануванням та обліком робочого часу, а також з управлінням персоналом. Це включає наявність актуальної інформації про працівників

із можливістю їх гнучкого оновлення, відслідковування робочого часу та відвідуваності, управління запитами на відпустки та лікарняні, а також виконання інших адміністративних процедур.

Для виконання поставлених завдань в повній мірі потрібно створити гнучку і здатну до розширення архітектуру проекту, яка забезпечить стабільне і надійне виконання поставлених завдань. Архітектура повинна дозволяти легко додавати нові функціональні можливості без суттєвих змін існуючого коду; забезпечити швидкий і надійний обмін даними між усіма частинами програми. Це включає інтеграцію між серверною і клієнтською

частинами вебзастосунку, а також можливість інтеграції з зовнішніми системами через API.

Аналіз останніх досліджень і публікацій.

Питання керування робочим часом привертає увагу все більше науковців. Зокрема, Євтушенко Г. І., Дерев'янюк В. М. у своєму дослідженні аналізують стан управління робочим часом та шляхи підвищення ефективності застосування «Тайм-менеджменту» в організації [1]. Писаревська Г. І. розглядає можливості використання тайм-менеджменту для підвищення ефективності управління персоналом [2].

Крикун О. О., Медяник Ю. Г. дослідили вибір менеджером електронних інструментів для створення ефективної системи тайм-менеджменту [3]. Інша група авторів розглядала в колективній праці технології тайм-менеджменту в управлінській діяльності державних службовців [4]. Примак Т. Ю., Васильчук О. В. розглядали тайм-менеджмент як інструмент підвищення ефективності діяльності туристичного підприємства [5].

Постановка завдання. Метою статті є провести аналіз можливих засобів реалізації вебзастосунку для керування робочим часом.

Виклад основного матеріалу.

1. Визначення архітектури вебзастосунку

При плануванні проекту було вирішено розробити систему управління персоналом за допомогою вебтехнологій. Вибір обумовлений доступністю оптимального інструментарію для розробки у вигляді вебзастосунку, що спрощує використання та підтримку системи. Одночасно потрібно реалізувати можливість одночасного доступу до ресурсу для багатьох користувачів через мережу, що і є основними перевагами вебсередовища, яке надає локальний мережевий доступ та можливість спільної роботи.

Для розробки застосунку було обрано клієнт-серверну архітектуру, що є стратегічним рішенням, орієнтованим на оптимальний розподіл функцій та завдань між клієнтською та серверною частинами системи. Цей вибір дозволяє ефективно управляти обробкою даних, взаємодією з користувачем та забезпечити гнучкість у розробці та масштабуванні системи. Клієнт-серверна архітектура дозволяє розділити відповідальності між фронтендом та бекендом, сприяючи оптимізації роботи застосунку та покращенню користувацького досвіду. Такий підхід також полегшує можливість розширення та підтримки системи в подальшому.

Визначимо *архітектуру* серверної частини вебзастосунку. Серверна частина є ядром системи

і буде виконувати увесь основний функціонал системи. Сервер відповідальний за усі обрахунки, прийняття рішень, надання доступу до функцій, збирання та зберігання інформації. Тому критично важливим є вибір архітектури для забезпечення масштабованості, оптимізованості, простоти розробки, надійності, безпеки і швидкості роботи системи та ще й з урахуванням доступних ресурсів.

Розглянемо основні види архітектур та їх специфіку.

Монолітна архітектура – даний вид архітектури є традиційним і стандартним для більшості програмних продуктів, тому більшість програмного коду, який можна знайти в інтернеті (в тому числі і навчальний матеріал), написаний саме у вигляді монолітної архітектури [6]. Цей тип архітектури передбачає написання програмного коду у вигляді об'єднаної автономної одиниці, яка є незалежною від інших програм. Тобто програмний продукт має представляти собою одну велику обчислювальну мережу з однією кодовою базою, яка об'єднує весь функціонал разом в одному місці.

Наведемо основні переваги даної архітектури. Оскільки один виконуваний файл або каталог дозволяє значно спростити розгортання проекту, то це власне полегшує подальшу експлуатацію. Якщо застосунок має одну кодову базу – це полегшує розробку. У централізованій базі коду та сховищі, один API може виконувати ту саму функцію, яку виконують численні API в інших архітектурних шаблонах. Окрім того, end-to-end тестування виконувати значно легше ніж у розподіленій системі. Також централізована кодова база дозволяє простіше відслідковувати запити та знаходити помилки [6]. Проте у даного виду архітектури є й свої недоліки. Зокрема, відсутність великої масштабованості проекту, складність розробки якого буде рости паралельно із розміром застосунку, призведе до неможливості працювати над цим проектом в подальшому. Якщо певна частина коду працює некоректно, це може вплинути на роботу усієї системи, що призведе до великих проблем у роботі з системою. Будь-яка зміна в окремій частині застосунку тягне за собою зміни по всьому проекту, що є великою затратою часу. Також варто відмітити, що будь-яка зміна в проекті потребує повного повторного розгортання проекту.

Враховуючи вимоги до масштабованості у гнучкості власної розробки, було прийнято рішення відмовитися від неї через значні ускладнення при збільшенні розмірів проекту. Крім

того, розробка програмного продукту, в даному випадку, може зайняти значно більше часу і при цьому не дасть відчутних переваг.

Мікросервісна архітектура – це архітектурний шаблон, який ґрунтується на серії служб, які розгортаються незалежно один від одного. Кожна служба має свою власну бізнес-логіку та базу даних з конкретною метою.

Оновлення, тестування, розгортання та масштабування відбуваються всередині кожної служби. Мікросервіси роз'єднують значні бізнес-специфічні частини на окремі, незалежні кодові бази. Мікросервіси не зменшують складність, але вони роблять будь-яку складність видимою та керованою, розділяючи завдання на менші процеси, які працюють незалежно один від одного та сприяють загальному цілому.

Запровадження мікросервісів часто йде через залучення DevOps-спеціалістів, оскільки вони є основою для безперервної доставки, які дозволяють командам швидко адаптуватися до вимог користувачів.

При цьому варто відмітити, що наявна велика гнучкість при розробці із частим розгортанням проекту, можливість робити оновлення частіше і швидше. Також в такому випадку легше налаштувати масштабованість навантаження на окремі частини продукту; система набагато краще побудована для підтримки і усунення помилок. Окрім того, можна вибрати будь-які технології для реалізації окремих одиниць програми, а також зміни стосуються лише окремого сервісу системи.

Окрім того, варто відмітити, що система має вищу загальну складність і може мати набагато ширше коло використаних технологій, а кожен окремий сервіс має власну інфраструктуру, тому і розгортається окремо, через це також росте кількість ресурсів, що потрібна на утримання такого проекту. Також через те, що технології та кодова база сервісів можуть суттєво відрізнитися, то їх стає доволі важко стандартизувати, окрім того, якщо проект має помилку, то знайти її важче на фоні багатьох функціонуючих сервісів.

Провівши аналіз особливостей мікросервісної архітектури, було прийнято рішення відмовитись від її застосування для проекту. Основна причина відмови це знадто велика кількість ресурсів, що потрібна для організації такої архітектури. Така архітектура буде доцільнішою для проектів, що мають більшу кількість ресурсів.

N-шарова архітектура – це розділення логіки програми на певні рівні. Архітектурний шаблон N-рівня є зрілою архітектурою та просто стосу-

ється додатків, які розділяють різні логічні рівні на окремі фізичні рівні [7].

Такий тип архітектури часто використовують як збалансований і перевірений архітектурний шаблон, який має багато переваг і націлений на програми що швидко розвиваються. Тому цей шаблон доволі часто використовуються через його адаптивність до різних вимог програмного застосування.

Традиційна трирівнева програма має рівень презентації, середній рівень логіки і рівень бази даних. Середній ярус необов'язковий. Більш складні програми можуть мати більше трьох рівнів.

N-рівнева архітектура також дуже часто використовуються в багатьох проектах що реалізовані на принципах ООП, адже цей тип архітектури допомагає дотримуватися принципів SOLID, що позитивно сказується на якості та стабільності програми, а також її підтримкою.

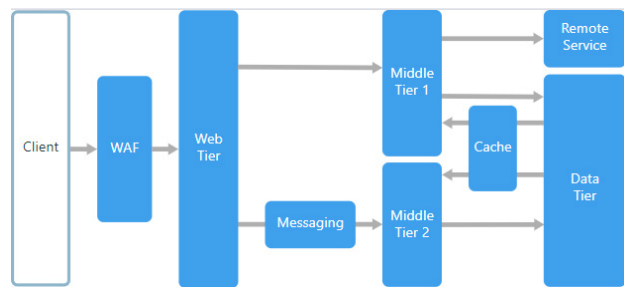


Рис. 1. Схема N-шарової архітектури [7]

При використанні даного типу архітектури помилка або збій в одному з рівнів менш ймовірно вплине на функціональність інших рівнів, а наявність кількох відокремлених компонентів в архітектурі дозволяє легко масштабувати, оновлюючи один або декілька з цих індивідуальних компонентів, окрім того, зміни, внесені в одну секцію, не впливають на інші функції. Також варто відмітити, що кожен рівень працює на власній інфраструктурі або сервері, тому ресурси не діляться.

При цьому зазначимо, що більша кількість рівнів може призвести до збільшення складності системи, а розробка та підтримка багаторівневої архітектури можуть бути дорожчими через її складність в порівнянні з монолітною архітектурою. Також є очевидним те, що чим більше рівнів, тим більше часу потрібно для обробки запитів, що може вплинути на продуктивність, при цьому управління багаторівневою архітектурою може бути складним, особливо при масштабуванні.

Через наявність одночасно масштабованості проекту, зручності розробки, якості, швидкості та надійності за збалансовану кількість ресурсів,

було прийнято рішення застосувати саме цей архітектурний шаблон.

Для серверної частини застосунку була обрана трьохшарова архітектура, яка включає шар даних, шар логіки та шар API. Це рішення дозволяє чітко розділити функціональні компоненти та відповідальності між різними рівнями системи. У шарі даних відбувається управління базою даних та зберіганням інформації, шар логіки відповідає за обробку та виконання бізнес-логіки, тоді як шар API надає інтерфейс взаємодії для клієнтської частини. Ця архітектурна модель сприяє покращенню читабельності коду, підтримці та розширенню системи, а також спрощує тестування та вдосконалює загальну продуктивність.

2. Визначення структури клієнтської частини вебзастосунку

Для забезпечення масштабованості проекту критично важливим було впровадити зручну клієнтську архітектуру програми. Потрібно було обрати такий тип архітектури, який дозволив би зручно перевикористовувати код і його елементи, а також відокремити бізнес-логіку та графічну компоненти системи.

Реактивне програмування (RP) – це парадигма програмування, у якій основна увага приділяється потокам даних та їхній автоматичній обробці в реальному часі. RP передбачає швидку реакцію програми на зміни, а також використання асинхронних операцій [8].

Основні принципи RP – це створення реактивних функцій, управління подіями та їхнє опрацювання в реальному часі, а також використання патернів проектування для зручного управління потоками даних.

При реактивному програмуванні легко управляти великою кількістю асинхронних подій, наявна можливість комбінувати і трансформувати потоки даних у гнучкий і декларативний спосіб, при цьому реактивне програмування полегшує роботу з побічними ефектами, такими як мережеві запити. Однак, з іншого боку, використання реактивного програмування може бути надмірним для простих задач, а крута крива навчання для розуміння концепцій і операторів реактивного програмування.

Flux архітектура дозволяє легко міркувати про програму у спосіб, який нагадує функціональне реактивне програмування, або, точніше, програмування потоку даних або програмування на основі потоку, де дані проходять через програму в одному напрямку. Стан програми підтримується лише в сховищах, що дозволяє різним частинам програми залишатися сильно відокремленими.

Там, де між магазинами виникають залежності, вони зберігаються в строгій ієрархії з синхронними оновленнями, керованими диспетчером.

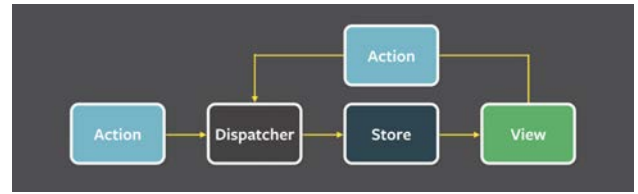


Рис. 2. Схема принципу роботи Flux архітектури [8]

Ідеї Flux архітектури також розвиває методологія Re-ducts, яка полягає у створенні файлової структури, яка є масштабованою та легкою для дотримання. Використання Redux для керування станом призводить до великої кількості дій, які використовуються в кількох компонентах, і структурі стану, яка має кілька рівнів. Як наслідок, ефективний спосіб імпортування функціональності в кілька файлів/компонентів є ключовим для уникнення помилок.

У результаті проведеного аналізу, було обрано за основу ці дві концепції і вирішено модифікувати під потреби проекту.

3. Обґрунтування вибору інструментальних засобів

Для створення архітектури застосунку, що створюється для такої критично важливої сфери як управління персоналом, потрібно обрати технології що зможуть забезпечити ефективність, стабільність та зручність впровадження нового функціоналу.

Вибір бази даних є критично важливим під час планування розробки. Від цього залежить ефективність та швидкодія проекту, його масштабованість та можливість оптимізації в подальшому. Важливо обрати базу даних, яка відповідає конкретним вимогам проекту, забезпечить надійність зберігання та швидкість доступу до інформації. Окрім того, важливо враховувати масштаби та обсяги даних, які будуть оброблятися, а також можливості інтеграції з іншими системами. Всі ці фактори сприятимуть успішній реалізації та подальшому успіху системи управління людськими ресурсами.

Було прийнято рішення використовувати реляційну базу даних SQL і СУБД SQL Server для досягнення оптимальних рішень. Реляційна база даних зможе виокремити чітку структуру і таблиці, які можна зручно використовувати та розширювати. Крім того, важливу роль у виборі зіграла високий рівень сумісності із технологі-

ями, що будуть використані при розробці серверної частини вебсервісу.

Для реалізації серверу вебзастосунку було обрано використання мови програмування C# та фреймворку ASP.NET. Це стратегічне рішення дозволило забезпечити ефективність, надійність та швидкість в розробці серверної частини системи. Мова C# володіє великою популярністю в розробці вебзастосунків, а фреймворк ASP.NET забезпечує високий рівень абстракції та простоту в роботі з вебтехнологіями.

В основі шару даних серверної трьох-шарової архітектури для взаємодії з базою даних використовується Dapper – простий та швидкий ORM (Object-Relational Mapping) для мови програмування C#. Dapper надає простий і дуже ефективний інтерфейс для виконання запитів до бази даних, що сприяє оптимальній роботі з даними та підвищує продуктивність вебзастосунку. Це рішення допомагає забезпечити ефективну та швидку взаємодію з базою даних, роблячи систему більш масштабованою та продуктивною.

Для того, щоб задовільнити додаткові вимоги проекту були використані інші додаткові пакети. Наприклад, був застосований MailKit, для створення і надсилання електронної пошти. Для вирішення проблеми розвитку схеми бази даних для кількох баз даних були задіяні міграції за допомогою FluentMigrator. Quartz.Net було використано для виконання запланованих завдань. А пакет EPPlus надає зручний інструментарій для створення XML (.xml) та EXCEL (.xlsx) файлів.

У процесі розробки серверу веб-сервісу було вирішено використовувати GraphQL як мову запитів до API для забезпечення гнучкості та ефективності. Це технологія спрощує взаємодію і зменшуючи мережевий трафік завдяки можливості отримувати лише необхідні дані. Для продуктів, що націлені на велику масштабованість, GraphQL забезпечує гнучкість відносно структури даних, підтримку кешування для оптимізації швидкості та масштабованості системи, а також гнучкий механізм керування доступом до даних, забезпечуючи безпеку та конфіденційність.

Реалізація GraphQL для серверу веб-сервісу була здійснена за допомогою бібліотеки GraphQL.Net. Цей інструментарій надає потужний фреймворк для впровадження GraphQL в .NET-середовищі, який лежить в основі шару API трьох-шарової архітектури серверу. Використання GraphQL.Net дозволяє ефективно вирішувати завдання з обробки та відповіді на GraphQL-запити, забезпечуючи зручний та ефективний механізм обміну даними між клієнтом та сервером.

Для реалізації клієнтської частини технологій було обрано мову TypeScript як розширену типізовану версію JavaScript та бібліотеку React для впровадження інтерфейсів на основі технології SPA (Single-Page Application). React є гарним прикладом бібліотеки що має в основі концепції компонентно-орієнтованої архітектури відображення графічних елементів.

Для керування внутрішнім станом клієнтського застосунку і реалізацією Flux архітектури використовувалися такі технології як Redux та Redux Toolkit для керування станом програми. Вони запроваджують єдине та централізоване для усього застосунку джерело стану в передбачуваному стані та методи його зміни.

Для реалізації концепції реактивного програмування також використовувалися бібліотеки RxJS та Redux-Observable. Використовування реактивного програмування дозволяє нам створити неперервний, контрольований та асинхронний потік даних в застосунку. Також бібліотеки надають великий функціонал для створення сторонніх ефектів як асинхронні запити на API.

Висновки. Під час дослідження напрямків використання інформаційних технологій для реалізації вебсистеми управління персоналом, було досліджено усі важливі аспекти початкового планування вебсистеми та участі інформаційних технологій в них. Було проведено детальну роботу для постановки завдання розробки. Під час виконання цієї частини роботи було визначено тип вебсистеми, її мету, її масштаби і детальні кроки для досягнення бажаного результату. Проведено критично важливу роботу із визначенням архітектури вебсистеми. Прийнято рішення зупинитися на використанні вебтехнологій для досягнення найкращих результатів. Було обрано використовувати клієнт-серверну архітектуру для розподілення функцій системи. Проведено аналіз монолітної, N-шарової та мікросервісної архітектури для серверної частини вебсервісу. Прийнято рішення використовувати N-шарову архітектуру як рішення збалансоване між технічними перевагами та економією ресурсів.

Було проведено детальний аналіз можливих варіантів клієнтської архітектури. Було прийнято рішення використовувати концепцію реактивного програмування, архітектури Flux та методологію Re-ducks для клієнтської бізнес-логіки та компонентно-орієнтовану архітектуру створення графічних елементів інтерфейсу. Було обрано та обґрунтовано цей вибір інструментальних засобів для реалізації вебсистеми із урахуванням усіх бізнес-вимог проекту та обраних архітектурних рішень.

Список літератури:

1. Євтушенко Г. І., Дерев'янку В. М. Аналіз стану управління робочим часом та шляхи підвищення ефективності застосування "Тайм-менеджменту" в організації. Збірник наукових праць Національного університету державної податкової служби України. 2014. № 1. С. 88-96. URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/zpnrudps_2014_1_12
2. Писаревська Г. І. Використання тайм-менеджменту для підвищення ефективності управління персоналом. Науковий вісник Херсонського державного університету. Сер. : Економічні науки. 2016. Вип. 20(1). С. 148-153. URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/Nvkhdu_en_2016_20%281%29_38
3. Крикун О. О., Медяник Ю. Г. Вибір менеджером електронних інструментів для створення ефективної системи тайм-менеджменту. Проблеми сучасних трансформацій. Серія: економіка та управління, 11, 2024. DOI: 10.54929/2786-5738-2024-11-04-04
4. Технології тайм-менеджменту в управлінській діяльності державних службовців: монографія / Л.Л. Приходченко, Н.В. Піроженко, М.П. Кернова, І.М Синчак ; під заг. ред Л.Л. Приходченко. Одеса: ОРІДУ НАДУ, 2021. 180 с.
5. Примак Т. Ю., Васильчук О. В. Тайм-менеджмент як інструмент підвищення ефективності діяльності туристичного підприємства. Ефективна економіка. 2019. № 12. DOI: 10.32702/2307-2105-2019.12.70
6. Microservices vs. monolithic architecture. URL: <https://www.atlassian.com/microservices/microservices-architecture/microservices-vs-monolith>.
7. N-tier architecture style. URL: <https://learn.microsoft.com/en-us/azure/architecture/guide/architecture-styles/n-tier>.
8. Реактивне програмування: що це таке та його особливості. URL: <https://foxminded.ua/reaktyvne-prohramuvannia/>.
9. Flux In-Depth Overview. URL: <https://facebookarchive.github.io/flux/docs/in-depth-overview/>.

Melnychenko D.V., Vakaliuk T.A., Farrakhov O.V., Kot N.S. ANALYSIS OF THE TOOLS FOR IMPLEMENTING A WEB APPLICATION FOR WORKING TIME MANAGEMENT

The article studies information technologies for implementing a web-based personnel management system. It examines all essential aspects of the initial planning of the web-based system and the participation of information technologies in it. Developing a web-based application for working time management with elements of a personnel management system will automate routine tasks related to the planning and accounting of working time and personnel management. In order to fulfil the tasks in total, it is necessary to create a flexible and extensible project architecture that will ensure stable and reliable performance of the tasks. The authors carried out detailed work to set the development task. During this part of the work, the type of web system, its purpose, scope and detailed steps to achieve the desired result were determined. Significant work was done to define the architecture of the web system. Various possible architecture options were analysed, and their capabilities were presented. It was decided to use web technologies to achieve the best results. A client-server architecture was chosen to distribute the system's functions. In the article was analysed monolithic, N-layer and microservice architectures for the server side of the web service. As a result of the study, it was decided to use the N-layer architecture as a solution balanced between technical advantages and resource savings. A detailed analysis of possible client architecture options was also carried out, resulting in a decision to use the concept of reactive programming, Flux architecture and the Re-ducks methodology for client business logic. The tools used to implement the web system were selected and justified, considering all the project's business requirements and the selected architectural solutions.

Key words: implementation tools, working time management application, architecture, N-layer architecture, reactive programming.

Мовчан К.О.Український науково-дослідного інститут спеціальної техніки та судових експертиз
Служби безпеки України

СУЧАСНІ СТРАТЕГІЇ НАВІГАЦІЇ ДРОНІВ У ВИПАДКАХ ВІДСУТНОСТІ GPS СИГНАЛУ

У статті розглядається динамічний розвиток автономних інтелектуальних систем, зокрема безпілотних апаратів, та постійне вдосконалення їх навігаційних алгоритмів. Розкрито ключові аспекти навігації, локалізації та картографування, які є критично важливими для забезпечення надійного функціонування безпілотних транспортних засобів у реальних умовах експлуатації. З'ясовано, що одним із найбільш актуальних завдань є навігація дронів у середовищах з обмеженим або повністю відсутнім доступом до сигналів GPS. У статті визначено, що традиційні навігаційні системи значною мірою покладаються на GPS як основний елемент для точного позиціонування. Однак підкреслюється, що зростаюча складність завдань, які виконуються сучасними безпілотними апаратами, вимагає розробки альтернативних методів навігації. Ці методи є особливо важливими для експлуатації в умовах, де доступ до GPS може бути ускладнений або взагалі неможливий. Наведені приклади включають середовища з сильним затуханням сигналу, як-то приміщення, міські забудови, а також сценарії з навмисними перешкодами. Незважаючи на наявність сигналів GPS у деяких середовищах, їх точність виявляється недостатньою для виконання точних завдань, таких як високоточне картографування та навігація. Аналіз наукової літератури показав, що поточні дослідження зосереджені на розробці систем тривимірної реконструкції оточення в режимі, наближеному до реального часу. Такі системи забезпечують автономну роботу безпілотних апаратів, надаючи їм можливість створювати та оновлювати високоточні карти навколишнього середовища. Паралельно ведуться роботи зі створення мультисенсорних систем розпізнавання об'єктів. У статті визначено, що ці системи базуються на поєднанні даних від камер, лідарів та інерціальних вимірювальних блоків, що дозволяє дронам ефективно орієнтуватися в просторі та автономно приймати рішення в реальному часі. Окрему увагу приділено алгоритмам одночасної локалізації та картографування (SLAM), що є ключовими для автономної навігації. З'ясовано, що ці алгоритми дозволяють безпілотним апаратам створювати детальні карти навколишнього середовища та визначати власне місцеположення відносно цих карт. Відзначається, що SLAM-системи адаптуються до різних сценаріїв експлуатації: від міських ландшафтів до густих лісових масивів, забезпечуючи універсальність дронів для різних завдань, включаючи ті, що потребують автономної навігації в складних середовищах. Також розкрито важливість розвитку автономних систем для роботи в нічних умовах або під час складних метеорологічних явищ, коли традиційні системи навігації, що базуються на GPS, можуть виявитися ненадійними або навіть непридатними. Розробка альтернативних підходів до навігації, таких як використання систем комп'ютерного зору та мультисенсорного сприйняття, є критично важливою для забезпечення надійної експлуатації безпілотних систем у таких умовах. Наголошується, що поєднання технологій, таких як алгоритми SLAM, системи розпізнавання об'єктів та тривимірного моделювання, є важливим напрямком для подальшого розвитку автономних інтелектуальних систем. Інтеграція цих технологій дозволить створити більш гнучкі та надійні навігаційні рішення для різних типів безпілотних апаратів, включаючи дрони для цивільного та військового застосування. Підкреслюється, що технології спрямовані на вдосконалення навігаційних систем для дронів мають потенціал значно розширити межі застосування автономних безпілотних систем, забезпечуючи їх здатність виконувати складні завдання в найрізноманітніших середовищах, особливо в умовах обмеженого доступу до супутникових сигналів. Інтеграція новітніх алгоритмів і сенсорних технологій забезпечує можливість розгортання автономних дронів у найскладніших умовах, підвищуючи їх корисність і надійність у різних сферах діяльності.

Ключові слова: безпілотний апарат, візуальний SLAM, безкартографічна система, система з побудовою карт, система з використанням картографічної інформації, навігація в умовах відсутності GPS.

Постановка проблеми. Безпілотні апарати, часто відомі як дрони, представляють технологію, що швидко розвивається і характеризується здатністю виконувати різноманітні місії без наявності пілота на борту. Їхнє поширення в цивільному і військовому секторах пояснюється високою мобільністю, адаптивністю і широким спектром місій, які вони можуть виконувати – від розвідки і картографування до патрулювання, конвоювання, відстеження, знищення ворожих цілей та іншого роду задач. Проте, однією з найважливіших проблем у місіях дронів є необхідність надійної навігації в умовах відсутності або недоступності сигналів глобальної системи позиціонування (GPS – Global Positioning System), що становить одну з найсуттєвіших технічних проблем у сфері експлуатації автономних систем. Ця проблематика набуває особливої актуальності в контексті зростаючої потреби у функціонуванні дронів у середовищах з обмеженим доступом до супутникових навігаційних сигналів. Відсутність надійного GPS-сигналу може бути зумовлена різноманітними факторами, включаючи:

- природні перешкоди – густа рослинність, гірський рельєф, міські забудови;
- штучні джерела інтерференції – електромагнітні завади від промислових об'єктів;
- обмеження доступу – закриті приміщення, підземні споруди;
- умисне блокування сигналу – застосування спеціалізованих засобів радіоелектронної боротьби.

Важливість систем навігації, що доповнюють або замінюють GPS неможливо переоцінити, особливо в критично важливих місіях, де втрата сигналів GPS може призвести до провалу місії або навіть до катастрофічних наслідків. Наприклад, у військових операціях, де сигнали GPS можуть бути заглушені або підроблені противником, покладання виключно на GPS може поставити під загрозу здатність дрона виконати свою місію. Аналогічно, під час розвідувальних місій над густими лісами або в підземних умовах сигнали GPS можуть бути слабкими або взагалі відсутніми, що вимагає альтернативних стратегій навігації.

Математичний апарат, що лежить в основі керування автономними навігаційними системами (дронами), ґрунтується на таких дисциплінах, як нелінійна оптимізація, теорія графів та імовірнісні методи. Характерним прикладом є оптимізація графів, яка відіграє центральну роль у системах SLAM (simultaneous localization and mapping). Застосування нелінійної оптимізації та теорії гра-

фів є фундаментальним для вирішення задач, пов'язаних з навігацією дронів у складному середовищі. Нелінійні методи оптимізації дозволяють ефективно обробляти нелінійні взаємозв'язки між змінними, що є характерними для реальних систем. Теорія графів забезпечує зручний формалізм для представлення та аналізу складних просторових відношень між об'єктами, такими як позиціонування дронів та орієнтири. Інтеграція цих математичних концепцій не лише підвищує надійність навігаційних алгоритмів, але й сприяє розробці більш досконалих систем дронів, здатних працювати в складних умовах. Серед перспективних підходів до вирішення цієї проблеми можна виділити:

- інерційні навігаційні системи з корекцією дрейфу;
- візуальну одометрію на основі комп'ютерного зору;
- лідарні системи (LiDAR – Light Detection and Ranging, виявлення та визначення відстані за допомогою лазерного променя) для тривимірного картографування середовища;
- радіочастотне позиціонування з використанням наземних маяків.

Кожен з цих методів має свої переваги та обмеження, що зумовлює необхідність їх комплексного застосування для досягнення оптимальної ефективності навігації БПЛА в умовах відсутності GPS-сигналу.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Експериментальні дослідження функціонування дронів виявляють їх високу ефективність при вирішенні завдань у комплексних просторових конфігураціях з непередбачуваною топологією завдяки своїм ключовим характеристикам: мінімальним масо-габаритним показникам, підвищеній маневреності та гнучкості алгоритмів керування. Сучасні дрони оснащуються комплексом високоточних сенсорних систем, що включають:

- глобальні навігаційні супутникові системи (GNSS), такі як GPS, ГЛОНАСС або Galileo, для точного визначення географічних координат;
- оптико-електронні системи спостереження, що забезпечують візуальну інформацію про навколишнє середовище;
- лазерні системи виявлення і визначення дальності (LiDAR), за допомогою яких створюються детальні тривимірні карти місцевості;
- інерціальні навігаційні системи (INS – Inertial Navigation System) для визначення орієнтації та прискорення апарату.

Оснащені такими технологіями дрони добре справляються з такими завданнями, як:

- точна локалізація в просторі з точністю до сантиметрів;

- виявлення та класифікація об'єктів у реальному часі за допомогою алгоритмів комп'ютерного зору та машинного навчання;

- автономне планування траєкторій руху та уникнення перешкод на основі аналізу тривимірного простору.

Попит на дрони, які здатні автономно орієнтуватися у складних умовах без втручання людини, зростає, що вимагає інтеграції ключових підсистем:

- системи навігації та управління рухом, що забезпечують точне позиціонування та маневрування в просторі;

- алгоритми локалізації та картографування (SLAM – Simultaneous Localization and Mapping), які дозволяють дрону будувати карту навколишнього середовища та визначати своє положення в ній;

- системи прийняття рішень на основі штучного інтелекту для виконання специфічних завдань місії та адаптації до змінних умов середовища.

Нещодавні дослідження підкреслюють важливість комплексних навігаційних систем. Так у роботі [1] проводиться огляд навігаційних компонентів дронів. Аналіз показує, що лише 16% досліджень успішно реалізували повну навігаційну стратегію, тоді як 62% зосереджені переважно на локалізації дрону. Очікується, що майбутній напрямок досліджень у цій галузі буде пов'язаний з впровадженням передових датчиків, камер та мініатюрних радіолокаційних систем. До того ж датчики в поєднанні зі складними алгоритмами, такими як адаптивні методи штучного інтелекту (ШІ), значно покращать можливості сприйняття дроном. Крім того, вдосконалення технологій локалізації є критично важливим, особливо з огляду на те, що 62% досліджень в цьому напрямку зосереджені на мінімізації ризику зіткнення, що часто вимагає використання високоточних симуляторів.

Аналіз сучасних систем навігації на основі комп'ютерного зору виявляє різноманіття стратегій. Наприклад, у роботі [2] поділяють навігацію на основі машинного зору на наступні компоненти: безкартографічні стратегії, стратегії з побудовою карт та картографічні стратегії з використанням заздалегідь збережених карт. Кожен з цих компонентів далі розділяється на підкомпоненти, такі як локалізація, картографування, уникнення перешкод та планування маршруту. Інше дослідження [3] розширює цей аналіз, оцінюючи навігаційні системи дронів на основі технічного зору як у приміщенні, так і на відкритій місцевості.

В той же час в роботі [4] підкреслюють ефективність поєднання монокулярних і стереокамер з інерційними вимірювальними блоками (IMU – inertial measurement unit) для оцінки положення, що виявляється швидшим і ресурсоефективнішим порівняно з методами одночасної локалізації і картографування (SLAM). Крім того, для автономної навігації досліджується технологія оптичного потоку (OF – optical flow). В роботі [5] розглядають методи на основі OF і визначають такі проблеми, як кількісна оцінка, обробка зображень з високою роздільною здатністю в реальному часі та інтеграція систем мультибачення.

Сучасні тенденції в автономній навігації дронів вказують на зростаючу залежність від технологій штучного інтелекту. В дослідженнях [6] надають детальний огляд, класифікуючи підходи ШІ на методи оптимізації, такі як оптимізація рою частинок (PSO – Particle Swarm Optimization), алгоритми оптимізації колоній мурах (ACO – ant colony optimization) і генетичні алгоритми (GA – genetic algorithm), а також методи навчання, такі як навчання з підкріпленням (RL – reinforcement learning), глибоке навчання з підкріпленням (DRL – deep reinforcement learning) і глибоке навчання (DL – deep learning). Порівняння їхніх можливостей, часової складності та налаштування параметрів дозволяє припустити, що майбутні досягнення, ймовірно, будуть зосереджені на обробці великих обсягів даних, обчислювальній потужності, енергоефективності та відмовостійкості. Крім того, дослідження фокусуються на вдосконаленні алгоритмів планування маршруту, уникнення перешкод, а також підвищенні точності локалізації апаратів. У роботі [7] класифікують методи 3D-планування маршрутів на п'ять категорій, аналізуючи їх на основі часової складності, статичних і динамічних середовищ та можливості застосування в реальному часі. В той же час в роботі [8] пропонується єдина метрика оцінки продуктивності, що дозволяє визначити, які методи є оптимальними за різних умов. Інші дослідження, як-от [5, 6], порівнюють традиційні алгоритми і методи, засновані на обчислювальному інтелекті, відповідно, надаючи уявлення про часові витрати, відхилення і застосовність у 2D і 3D середовищах.

Визначення просторового положення дронів за допомогою комплексу датчиків є ключовим напрямком сучасних досліджень у сфері навігації. Наприклад, в роботі [9] розглядають стратегії локалізації на основі абсолютного зору, пристосовані для зовнішніх умов, порівнюючи їх на основі

популярних методів, практичних налаштувань та показників ефективності. В [10] зосереджуються на внутрішніх середовищах, де GPS-сигнали слабкі, класифікуючи стратегії локалізації на основі типів датчиків, включаючи камери, IMU, інфрачервоні, радіопередавачі/приймачі та ультразвукові пристрої та обговорюються їх переваги і обмеження.

Постановка завдання. Незважаючи на значні досягнення в галузі автономної навігації дронів, існуючі дослідження все ще стикаються з проблемами, такими як відсутність комплексного дослідження, яке охоплює всю стратегію навігації, включаючи незалежні підкомпоненти від збору даних до політики управління або планування шляху. Крім того, існує потреба в більш ретельних оціночних показниках для визначення ефективності цих стратегій, а також у тестуванні в реалістичних умовах для виявлення потенційних сфер для вдосконалення. Метою даної статті є аналіз сучасних стратегій навігації дронів в умовах відсутності GPS на основі використання карт, загальних характеристик і попередніх знань.

Виклад основного матеріалу. Відповідно з стратегіями аналізу навколишнього середовища і попередньої інформації, що використовується в навігації дронів, особливо в умовах відсутності GPS, системи візуальної локалізації і картографування можна умовно розділити на три окремі категорії: системи, які не використовують картографію, картографічні системи і системи з побудовою карт. Ці системи відіграють вирішальну роль у різних місіях, таких як військові операції, картографування, розвідка та супровід, де традиційні методи на основі GPS або недоступні, або ненадійні через глушіння сигналу, перешкоди або деградацію.

В умовах, коли доступ до GPS-сигналів обмежений, системи без використання картографії відіграють ключову роль, дозволяючи дронам здійснювати навігацію на основі даних про особливості навколишнього середовища, отриманих в режимі реального часу. Ці системи покладаються не на заздалегідь визначені карти, а на безперервне спостереження за навколишнім середовищем, визначаючи характерні особливості для навігації. Серед найбільш відомих методів, що використовуються в безкартографічній навігації, є методи оптичного потоку і методи відстеження об'єктів, кожен з яких має свої унікальні переваги і обмеження.

Методи оптичного потоку можна умовно поділити на дві групи: глобальні методи, вперше запропоновані в роботі [11], і локальні методи,

досліджені у роботі [12]. У дослідженні [13] представлено новаторський підхід до автономної навігації, який базується на імітації візуальної системи бджіл. Запропонована методика використовує бінокулярну камерну систему для оцінки оптичного потоку відносно навколишніх об'єктів. Алгоритм навігації ґрунтується на аналізі та порівнянні швидкості оптичного потоку з обох камер: ідентичні значення інтерпретуються як прямолінійний рух, тоді як розбіжності ініціюють корекцію траєкторії. Однак ефективність даного методу суттєво знижується в середовищах з низькою текстурною варіативністю. Незважаючи на це обмеження, робота заклала фундамент для подальшого розвитку алгоритмів аналізу оптичного потоку, особливо в контексті детекції та трекінгу об'єктів.

Слід відзначити, що за останні роки було зроблено значні вдосконалення. Запропонований у [14] метод базується на оптичному потоці для детектування змін сцени та характеристики навколишнього середовища. Синергія оптичного потоку та інерційних вимірювальних пристроїв (IMU) дозволяє значно розширити маневрені можливості дронів, включаючи точне зависання та виконання складних операцій, як-от посадка на мобільні платформи [15]. Впровадження технологій щільного оптичного потоку уможливило детектування руху множинних динамічних об'єктів [16], що є фундаментальним для реалізації високорівневих функцій спостереження та динамічного трекінгу.

Одним із перспективних напрямків у дослідженні безкартографічної навігації є відстеження візуальних ознак. Цей метод передбачає ідентифікацію та відстеження інваріантних об'єктів, таких як кути, лінії та інші характерні елементи середовища. Виявляючи ці об'єкти та аналізуючи їхній відносний рух на послідовних знімках, дрони можуть точно визначити їхній рух і положення [17]. Однією з сильних сторін відстеження об'єктів є його здатність повторно спостерігати раніше виявлені об'єкти з різних кутів, відстаней і за різних умов освітлення, що робить його дуже придатним для надійної навігації в різноманітних умовах [18].

Проте природні середовища часто характеризуються високим рівнем невизначеності та динамічності, що ускладнює надійне виявлення та уникнення перешкод для безпілотних літальних апаратів. Для подолання цієї проблеми у роботі [19] запропоновано інтегрувати візуальне розпізнавання орієнтирів з нечіткою логікою для підвищення адаптивності систем навігації.

Система з використанням картографії є важливою основою для автономної навігації дронів в умовах відсутності GPS сигналу. Ці системи покладаються на заздалегідь визначені просторові схеми, представлені у вигляді карт, що дозволяє дрону орієнтуватися в навколишньому середовищі, плануючи шляхи і здійснювати уникнення перешкод в разі потреби. Існує два основних типи карт, що використовуються в цих системах: карти на основі деревоподібної системи і карти основані на основі сітки зайнятості. Ці карти різняться за ступенем деталізації: від детальних 3D-моделей всього середовища до спрощених зображень просторових взаємозв'язків між об'єктами довкілля.

Кarti на основі деревоподібної системи широко використовуються завдяки їхньому ефективному відображенню тривимірних просторів. Наприклад, дослідники у [20] використовували об'ємний 3D-сенсор для розробки високодеталізованих карт міського середовища. Використовуючи багатовимірну деревоподібну карту, згенерована сенсором 3D-модель дозволила автономній роботизованій платформі ефективно досліджувати такі середовища. Ці карти не лише відображають зайняті території, але й надають детальне зображення вільних і невідомих просторів, що посилюється технікою стиснення, яка дозволяє ефективно зберігати і оновлювати дані. Аналогічно, автори [21] розвинули цю ідею, розробивши фреймворк з відкритим вихідним кодом для тривимірного моделювання середовища, що ще більше оптимізувало представлення на основі деревоподібної системи.

З іншого боку, карти на основі сітки зайнятості надають універсальний метод для навігації в складних 3D-середовищах. На відміну від карт на основі деревоподібної системи, які зосереджені на ієрархічній просторовій декомпозиції, сітки зайнятості явно зберігають детальну інформацію як про перешкоди, так і про вільні простори. У роботі [22] продемонстровано ефективність інтеграції стереозору для побудови таких карт у реальному часі. Запропонований авторами метод сегментації даних за розширеною лінією сканування дозволяє зменшити вплив шумів, характерних для стереозору, що підвищує точність отриманих карт.

Альтернативною методикою є багатовимірною сітка зайнятості, розроблена авторами [23]. Цей підхід не лише збирає дані про вільні та зайняті зони досліджуваного середовища, але й включає поступові оновлення для виправлення потенційно помилкових даних датчиків. Завдяки постійній фільтрації та об'єднанню нової сенсорної інфор-

мації, ця система може покращити точність карти з часом, що має вирішальне значення для динамічних середовищ.

Системи одночасного картографування та навігації набули значного поширення як в автономних, так і в напіваавтономних системах. Їх популярність стрімко зростає завдяки прогресу в техніці візуальної одночасної локалізації та картографування (VSLAM – visual simultaneous localization and mapping), яка дозволяє дрону створювати карти і локалізувати себе, використовуючи візуальні дані в реальному часі. Технологія VSLAM була значно вдосконалена протягом багатьох років, як зазначено в роботах [24, 25], і зараз вона є важливим інструментом в умовах відсутності GPS.

З постійною мініатюризацією дронів їх можливості щодо корисного навантаження стають все більш обмеженими. Це обмеження змушує дослідників зосередитися на простіших і легших датчиках, в першу чергу, на одній або декількох камерах, замість того, щоб покладатися на більш громіздкі і складні датчики, такі як лазерний радар або гідролокаційні системи. Ранні спроби створити системи візуальної навігації, такі як проект [26] базувалися на примітивних алгоритмах обробки зображень та були обмежені у обчислювальних ресурсах. З часом методи SLAM, що базуються на зоровому аналізі, вдосконалювалися для подолання цих обмежень і перетворилися на більш складні алгоритми, призначені для відновлення як положення камери, так і структурних особливостей оточуючого середовища. Ці сучасні алгоритми можна умовно поділити на три типи залежно від того, як вони обробляють дані візуальних сенсорів: непрямі, прямі та гібридні методи. Кожен підхід має різні сильні та слабкі сторони залежно від конкретних вимог до навігації та картографування.

Непрямі методи обробляють зображення, спочатку виділяючи ключові точки або особливості, такі як кути або контури, а потім використовують ці особливості для оцінки руху камери та структури оточення. Цей підхід зазвичай включає етапи виявлення, опису та зіставлення особливостей. Непрямі методи є ефективними в умовах, де сцена містить багато текстурованих об'єктів, що дозволяє легко виділити та зіставити особливості. Однак, вони можуть бути менш ефективними в умовах слабкої освітленості або при відсутності чітких текстур.

Прямі методи працюють безпосередньо з інтенсивностями пікселів зображення, що дозволяє уникнути етапу виділення особливостей. Ці

методи використовують всю доступну інформацію зображення для оцінки руху та структури, що робить їх більш стійкими до змін освітлення та текстури. Прямі методи можуть бути особливо корисними в умовах, де сцена має мало виражених особливостей або коли зображення містять багато шуму. Однак, вони можуть потребувати більше обчислювальних ресурсів через необхідність обробки великої кількості даних.

На відміну від непрямих або прямих методів, гібридні методи поєднують елементи як непрямих, так і прямих підходів, намагаючись використати переваги обох. Вони можуть, наприклад, використовувати непрямі методи для грубої оцінки руху, а потім уточнювати цю оцінку за допомогою прямих методів. Гібридні методи забезпечують гнучкість і можуть адаптуватися до різних умов, що робить їх універсальними для широкого спектра застосувань. Проте, їх реалізація може бути складнішою через необхідність інтеграції різних підходів.

На додаток до досягнень в SLAM, слід відмітити, що останні дослідження все більше зосереджуються на інтеграції декількох потоків даних від інерційних вимірювальних одиниць (IMU), ультразвукових датчиків і передових алгоритмів комп'ютерного зору. Ці датчики в поєднанні з візуальними даними дозволяють дронам краще орієнтуватися в складному середовищі навіть без GPS. Крім того, можливості обробки даних в реальному часі стали більш надійними, що дозволяє дронам обробляти величезні обсяги даних, з малою затримкою на прийняття рішення, що має вирішальне значення як для безпечного руху, так і для операційної ефективності.

Висновки. В умовах відсутності сигналу GPS навігаційні системи дронів використовують альтернативні системи, які можна розділити на три типи: безкартографічні, системи з побудовою карт та картографічні системи з використанням заздалегідь збережених карт. Кожна з них має свої переваги і недоліки. Безкартографічні системи покладаються виключно на дані датчиків у реальному часі, що дозволяє миттєво уникати перешкод і коригувати маршрут. Ці системи легкі в обчислювальному плані, але їм важко працювати в складних або великомасштабних середовищах через брак довгострокової інформації про навколишнє середовище. Картографічні системи використовують вже існуючі карти, що забезпечує ефективну навігацію зі зниженими обчислювальними вимогами. Однак вони обмежені точністю та повнотою картографічних даних, що робить їх ненадійними в динамічних або невідомих середовищах. Системи з побудовою карт, такі що базуються на технології VSLAM, дозволяють дрону створювати і оновлювати карти під час польоту, пропонуючи більшу гнучкість у складних середовищах. Такі системи забезпечують детальний 3D аналіз навколишнього середовища, але за рахунок підвищеної обчислювальної складності, вимог до обробки даних в реальному часі і енергоспоживання. До того ж розмиття при русі, шуми датчиків і проблеми синхронізації залишаються проблемами для всіх систем, особливо в динамічних умовах. Тому у майбутніх дослідженнях слід звернути увагу на необхідності покращення об'єднання різноманітних сенсорів у мультисенсорну систему, зменшення обчислювального навантаження та покращення прийняття рішень у реальному часі в складних, великомасштабних середовищах.

Список літератури:

1. Gyagenda N., Hatilima J.V., Roth H., Zhmud V. A review of GNSS-independent UAV navigation techniques, *Robot. Auton. Syst.* vol.152, 2022, pp.104069–104073.
2. Lu Y., Xue Z., Xia G.-S., Zhang L. A survey on vision-based UAV navigation, *Geo-Spatial Inf. Sci.* 21 (1), 2018, pp.21–32.
3. Arafat M.Y., Alam M.M., Moh S. Vision-based navigation techniques for unmanned aerial vehicles: Review and challenges, *Drones* 7 (2), 2023, pp.89–106.
4. Balamurugan G., Valarmathi J., Naidu V.P.S. Survey on UAV navigation in GPS denied environments, in: 2016 International Conference on Signal Processing, Communication, Power and Embedded System, 2016, pp.198–204.
5. Chao H., Gu Y., Napolitano M. A survey of optical flow techniques for UAV navigation applications, *International Conference on Unmanned Aircraft Systems (ICUAS)*, 2013, pp.710–716.
6. Rezwan S., Choi W. Artificial intelligence approaches for UAV navigation: Recent advances and future challenges, *IEEE Access*, 10, 2022, pp.26320–26339.
7. Yang L., Qi J., Xiao J., Yong X. A literature review of UAV 3D path planning, in: *Proceeding of the 11th World Congress on Intelligent Control and Automation*, 2014, pp. 2376–2381.
8. Amarat S.B., Zong P. 3D path planning, routing algorithms and routing protocols for unmanned air vehicles: a review, *Aircr. Eng. Aerosp. Technol.*, vol. 91, No. 9, 2019, pp. 1245–1255.
9. Couturier A., Akhloufi M.A. A review on absolute visual localization for UAV, *Robot. Auton. Syst.* 135, 2021, pp.103666–103674.

10. Pérez Rubio M.D.C., Gualda Gómez D., J.D. Vicente Ranera, Villadangos Carrizo J.M., Ureña Ureña J. Review of UAV positioning in indoor environments and new proposal based on US measurements, *Robotics and Autonomous Systems* 152, No. 2, 2019, pp. 104069–104077.
11. Horn B.K., Schunck B.G. Determining Optical Flow, *Artificial Intelligence*, 17, 1981, pp.185–203.
12. Lucas B. D., Kanade T. An Iterative Image Registration Technique with an Application to Stereo Vision, 7th International Joint Conference on Artificial Intelligence, Vancouver, Canada, 1981, pp. 121–130.
13. Gaspar J., Winters N., Santos-Victor J. Vision Based Navigation and Environmental Representations with an Omnidirectional Camera, *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, vol.16, No. 6, pp.890–898.
14. Nourani-Vatani N., Vinicius P., Borges K., Roberts J. M., Srinivasan M. V. On the Use of Optical Flow for Scene Change Detection and Description, *Journal of Intelligent & Robotic Systems*, vol.74, No. 3, 2014, pp. 817–825.
15. Herissé B., Hamel T., Mahony R., Russotto F. Landing a VTOL Unmanned Aerial Vehicle on a Moving Platform Using Optical Flow, *IEEE Transactions on Robotics*, vol.28, No. 1, 2012, pp.77–89.
16. Maier J., Humenberger M. Movement Detection Based on Dense Optical Flow for Unmanned Aerial Vehicles, *International Journal of Advanced Robotic Systems*, vol.10, No. 2, 2013, pp.146–157.
17. Cho D., Tsiotras P., Zhang G., Holzinger M. Robust Feature Detection, Acquisition and Tracking for Relative Navigation in Space with a Known Target, Paper Presented at the AIAA Guidance, Navigation, and Control Conference, Boston, 2013, pp.1853–1871.
18. Szenher M. D. Visual Homing in Dynamic Indoor Environments, PhD diss., University of Edinburgh, 2008, pp.228.
19. Li H., Yang S. X. A Behavior-based Mobile Robot with a Visual Landmark-recognition System, *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, vol.8, No. 3, 2003, pp.390–400.
20. Fournier J., Ricard B., Laurendeau D. Mapping and Exploration of Complex Environments Using Persistent 3D Model, *Computer and Robot Vision*, Fourth Canadian Conference on, IEEE, Montreal, Canada, 2007, pp.403–410.
21. Hornung A., Wurm K. M., Bennewitz M., Stachniss C., Burgard W. OctoMap: An Efficient Probabilistic 3D Mapping Framework Based on Octrees, *Autonomous Robots* vol.34, No. 3, 2013, pp.189–206.
22. Gutmann J., Fukuchi M., Fujita M. 3D Perception and Environment Map Generation for Humanoid Robot Navigation, *The International Journal of Robotics Research*, vol. 27, No. 10, 2008, pp.1117–1134.
23. Dryanovski I., Morris W., Xiao J. Multi-Volume Occupancy Grids: An Efficient Probabilistic 3D Mapping Model for Micro Aerial Vehicles, *Intelligent Robots and Systems*, IEEE/RSJ International Conference, China, 2010, pp.1553–1559.
24. Strasdat H., Montiel J. M., Davison A. J. Visual SLAM: Why Filter?, *Image and Vision Computing*, 30 (2), 2012, pp.65–77.
25. Aulinas J., Petillot Y. R., Salvi J., Lladó X. The SLAM Problem: A Survey, *Conference on Artificial Intelligence Research and Development*, 11th International Conference of the Catalan Association for Artificial Intelligence, Spain, 184(1), 2008, pp.363–371.
26. Moravec H. P. The Stanford Cart and the CMU Rover, *Proceedings of the IEEE*, 71 (7), 1983, pp.872–884.

Movchan K.O. MODERN DRONE NAVIGATION STRATEGIES IN GPS-DENIED ENVIRONMENTS

The article discusses the dynamic development of autonomous intelligent systems, including unmanned vehicles, and the continuous improvement of their navigation algorithms. The key aspects of navigation, localisation and mapping, which are critical for ensuring the reliable functioning of unmanned vehicles in real-world conditions, are revealed. It has been found that one of the most pressing tasks is the navigation of drones in environments with limited or no access to GPS signals. The article identifies that traditional navigation systems rely heavily on GPS as the main element for accurate positioning. However, it is emphasised that the increasing complexity of tasks performed by modern unmanned vehicles requires the development of alternative navigation methods. These methods are particularly important for operation in environments where access to GPS may be difficult or impossible. Examples include environments with strong signal attenuation, such as indoors, urban areas, and scenarios with intentional interference. Despite the presence of GPS signals in some environments, their accuracy is not sufficient to perform precise tasks such as high-precision mapping and navigation. An analysis of the scientific literature has shown that current research is focused on the development of near-real-time three-dimensional environment reconstruction systems. Such systems provide autonomous operation of unmanned vehicles, enabling them to create and update high-precision environmental maps. In parallel, work is underway to create multi-sensor object recognition systems. The article defines that these systems are based on a combination of data from cameras, lidars and inertial

measurement units, which allows drones to effectively navigate in space and make autonomous decisions in real time. Particular attention is paid to simultaneous localisation and mapping (SLAM) algorithms, which are key to autonomous navigation. It is found that these algorithms allow unmanned vehicles to create detailed maps of the environment and determine their own location relative to these maps. It is noted that SLAM systems adapt to various operating scenarios: from urban landscapes to dense forests, providing the versatility of drones for various tasks, including those requiring autonomous navigation in complex environments. The paper also highlights the importance of developing autonomous systems to operate at night or during severe weather events, when traditional GPS-based navigation systems may be unreliable or even unsuitable. The development of alternative approaches to navigation, such as the use of computer vision and multisensory perception systems, is critical to ensuring the reliable operation of unmanned systems in such conditions. It is emphasised that the combination of technologies such as SLAM algorithms, object recognition systems and three-dimensional modelling is an important direction for the further development of autonomous intelligent systems. The integration of these technologies will allow for more flexible and reliable navigation solutions for various types of unmanned vehicles, including drones for civilian and military use. It is emphasised that technologies aimed at improving navigation systems for drones have the potential to significantly expand the scope of autonomous unmanned systems, ensuring their ability to perform complex tasks in a variety of environments, especially in conditions of limited access to satellite signals. The integration of the latest algorithms and sensor technologies enables autonomous drones to be deployed in the most challenging environments, increasing their usefulness and reliability in various fields of activity.

Key words: *unmanned apparatus, visual SLAM, mapless system, map-building system, map-base system, navigation in GPS-denied environment.*

Назарова С.О.

Харківський національний економічний університет імені Семена Кузнеця

Назаров Д.Л.

Харківський національний економічний університет імені Семена Кузнеця

ТЕХНОЛОГІЯ РОЗРОБКИ ПРОГРАМНОГО ІНСТРУМЕНТАРІЮ ДЛЯ УПРАВЛІННЯ ДИСТАНЦІЙНОЮ ТРУДОВОЮ ДІЯЛЬНІСТЮ ВИКОНАВЦІВ ІТ-ПРОЄКТІВ

У статті запропоновано створення та практичну реалізацію технології розробки програмного інструментарію для управління дистанційною трудовою діяльністю виконавців ІТ-проектів. У якості об'єкта дослідження в даній статті виступає процес застосування програмної складової для розробки системи управління дистанційною трудовою діяльністю виконавців ІТ-проектів. Практична значущість даного дослідження полягає в розробленні рекомендацій стосовно розробки програмної складової системи управління дистанційною трудовою діяльністю виконавців ІТ-проектів. У статті наведено перелік і детальний опис основних етапів технології розробки програмного інструментарію для управління дистанційною трудовою діяльністю. Налаштування необхідних компонентів для розробки програмного інструментарію з метою керування дистанційною трудовою діяльністю в даній роботі здійснюється на основі використання середовища Eclipse. У статті описаний механізм встановлення з'єднання з базою даних з метою створення та заповнення всіх необхідних таблиць за допомогою Eclipse. За допомогою інструментарію Eclipse пропонується створення відображення Java Persistence API, які спрощують код доступу до даних. Функціонування веб-сервера та допоміжних компонентів в даній статті пропонується здійснювати за допомогою пакету програм JBossTools. Запропоновано перелік основних сутностей, які можуть бути частиною бази даних системи управління дистанційною трудовою діяльністю. У статті створена загальна архітектура шару сервісів програмного інструментарію для управління дистанційною трудовою діяльністю. Для системи управління дистанційною трудовою діяльністю в даній роботі рекомендується використовувати JSF-фреймворк з патерну MVC. У статті наведено результати розробки Web-проекту з архітектурою MVC. В даній роботі проаналізовані переваги середовища Eclipse з точки зору наявності інструментів, які дозволяють швидко скористатися стеком технологій Java EE, а також з позицій комфортної інтеграції з базою даних MySQL, Web-сервером JBoss та з усіма іншими необхідними компонентами. В статті поданий перелік можливих варіантів хостингу для розміщення web-проекту системи управління дистанційною трудовою діяльністю. У якості наукового результату проведеного дослідження виступає технологія розробки програмного інструментарію для управління дистанційною трудовою діяльністю виконавців ІТ-проектів.

Ключові слова: дистанційна трудова діяльність, технологія, програмний інструментарій, архітектура, web-проект, Eclipse.

Постановка проблеми. З розвитком інформаційних систем і технологій дистанційна робота стала звичним форматом для багатьох компаній, зокрема через пандемію COVID-19 і війну в Україні. Це створило потребу в ефективних інструментах для управління працівниками, які працюють віддалено. Інструментарій для управління дистанційною працею допомагає структурувати робочі процеси, ставити завдання, контролювати їх виконання та відстежувати прогрес. Це забезпечує прозорість і ефективність роботи, навіть якщо команда розташована в різних географічних точках. Використання спеціалізованих програмних

засобів дозволяє компаніям оптимізувати використання людських ресурсів і часу, що особливо важливо в умовах конкурентного ринку. З іншого боку, інструменти для управління дистанційною працею дозволяють керівникам відслідковувати виконання завдань у режимі реального часу, що допомагає уникати затримок та вирішувати проблеми на ранніх стадіях. Зібрані дані можуть використовуватися для аналізу продуктивності працівників, що дозволяє виявити вузькі місця і приймати обґрунтовані управлінські рішення.

Отже, актуальність створення технології розробки програмного інструментарію для управ-

ління дистанційною трудовою діяльністю виконавців ІТ-проектів обумовлена стрімкими змінами на ринку праці, збільшенням популярності віддаленої роботи, необхідністю забезпечення ефективної комунікації, контролю та безпеки. Такий інструментарій стає критично важливим для бізнесу в сучасних умовах і є необхідним для підтримки конкурентоспроможності, продуктивності та адаптації до нових викликів.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. В дослідженнях [1–3] пропонуються підходи щодо створення адаптивного інтерфейсу веб-базованих інструментальних засобів. Опис адаптивних алгоритмів, на основі яких можуть бути спроектовані конкретні елементи технології розробки програмного інструментарію для управління дистанційною трудовою діяльністю, представлений в роботах [4, 5]. У дослідженнях [6, 7] надаються рекомендації щодо адаптивної верстки для створення інтерфейсу веб-додатків та інструментальних засобів у реальному часі для навігації у віртуальному середовищі. Наукові праці [8, 9] містять методичні рекомендації щодо обґрунтування інноваційної стратегії розвитку інформаційних технологій як основи для проектування інструментарію для управління дистанційною трудовою діяльністю. Практичні рекомендації щодо використання Workflow, які можуть бути використані для оптимізації роботи програмного інструментарію для управління дистанційною трудовою діяльністю наведені в дослідженнях [10, 11].

Аналіз літературних джерел показує, що в спеціалізованій літературі відсутні методичні рекомендації щодо проектування технології розробки програмного інструментарію для управління дистанційною трудовою діяльністю виконавців ІТ-проектів.

Постановка завдання. Метою роботи є створення технології розробки програмного інструментарію для управління дистанційною трудовою діяльністю виконавців ІТ-проектів.

Об'єктом дослідження є процес застосування програмної складової для розробки системи управління дистанційною трудовою діяльністю виконавців ІТ-проектів.

Предметом дослідження є технологія розробки програмного інструментарію для управління дистанційною трудовою діяльністю виконавців ІТ-проектів.

Виклад основного матеріалу.

На основі аналізу потреб ринку, цільової аудиторії та технічних вимог було розроблено технологію створення програмного інструментарію для управління дистанційною трудовою діяльністю

виконавців ІТ-проектів, яка складається з наступних етапів.

1. Розробка Web-проекту серед Eclipse

Для налаштування всіх компонентів, необхідних для розробки програмного інструментарію для керування дистанційною трудовою діяльністю, доцільно використовувати середовище Eclipse. Eclipse добре інтегрується з базами даних, з Web-серверами та з усіма іншими необхідними компонентами. Eclipse включає інструменти, які дозволяють швидко скористатися стеком технологій Java EE. За допомогою Eclipse необхідно встановити з'єднання з базою даних з метою створення та заповнення всіх необхідних таблиць, а потім за допомогою тих самих інструментів створити відображення Java Persistence API, які спрощують код доступу до даних.

За допомогою середовища Eclipse також необхідно створити xhtml сторінки, різні конфігураційні xml-файли та безпосередньо самі java-файли. Одна з ключових особливостей Eclipse – використання концепції «Перспективи» (perspective). Різні перспективи надають користувачеві групи вікон та команд, орієнтованих певні типи розробки.

Після цього необхідно встановити пакет програм JBossTools, необхідний для функціонування самого веб-сервера та допоміжних компонентів.

2. Розробка сутностей системи

Тепер, коли середовище для застосування налаштоване, можна приступити до створення моделі предметної області. Створення починається з опису всіх сутностей системи.

Визначення та розробка цих сутностей є ключовим етапом у створенні технології розробки програмного інструментарію для управління дистанційною трудовою діяльністю виконавців ІТ-проектів. Вони забезпечують структуру та логіку системи, що дозволяє організувати ефективний процес управління віддаленими командами, забезпечити продуктивну співробітництво та контроль за виконанням завдань.

Основними сутностями, які можуть бути частиною такої системи управління дистанційною трудовою діяльністю виконавців ІТ-проектів, є наступні:

1. Користувач (User);
2. Завдання (Task);
3. Проект (Project);
4. Команда (Team);
5. Сповіщення (Notification);
6. Часовий запис (TimeLog);
7. Документ (Document);
8. Ролі та дозволи (RolePermission).

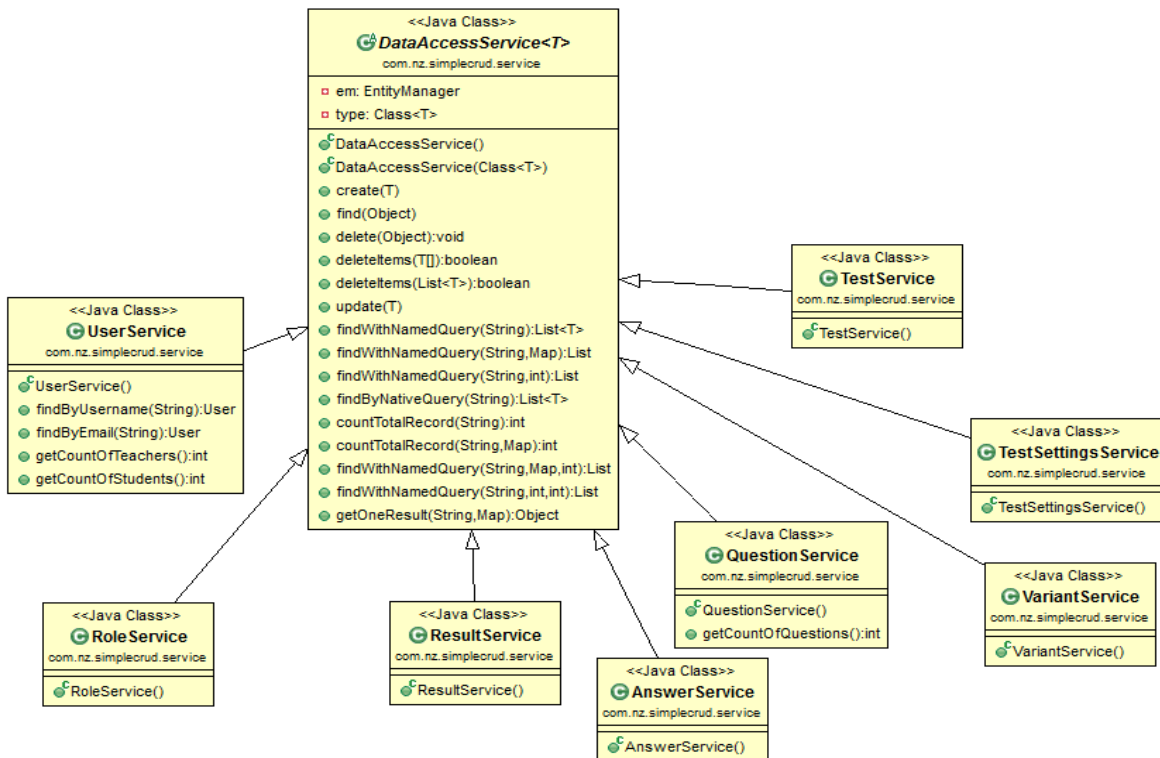


Рис. 1. Архітектура шару сервісів

3. Розробка шару сервісів

Клас `DataAccessService` виконує базові функції Create, Read, Update, Delete з даними, використовуючи базу даних як сховище для зберігання даних. Цей клас параметризовано. У конструкторі класів-спадкоємців викликається конструктор базового класу та передається фактичний тип об'єкта, з яким потрібно виконувати операції.

Для решти класів, які успадковують базовий, процес проходить аналогічно. На рис. 1 показаний приклад загальної архітектури шару сервісів.

4. Використання патерну MVC

Для системи управління дистанційною трудовою діяльністю виконавців ІТ-проектів доцільно використовувати JSF-фреймворк з патерну MVC. За Model відповідають самі сутності системи, за Controller – `ManagedBeans`, основне завдання яких – валідація введених користувачем даних, за необхідності їх конвертування у прийнятний формат, а також прослуховування певних подій. Коли така подія настає, викликаються методи шару сервісів, які виконують CRUD-операції над самими сутностями, які представляють модель. За View відповідають `html`-сторінки, де описані всі елементи, які відображатимуться користувачеві.

Продемонструємо розробку Web-проекту з архітектурою MVC.

Так як у проекті використовується JSF, то замість сервлет варто використовувати `ManagedBeans`. Вони є звичайними класами, але при цьому позначені анотаціями.

Спочатку треба створити контролер для виконання бізнес-логіки, потім `html`-сторінку.

Створення контролера слід здійснювати за допомогою Eclipse. Потім у перспективі Java EE необхідно створити новий клас, як показано на рис. 2.

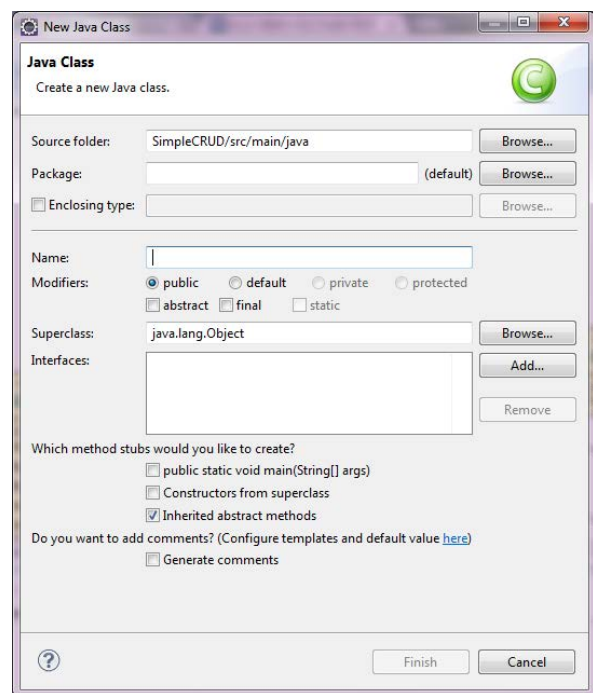


Рис. 2. Створення `ManagedBean`

Після цього слід створити xhtml-сторінку в Eclipse, це відображено на рис. 3.

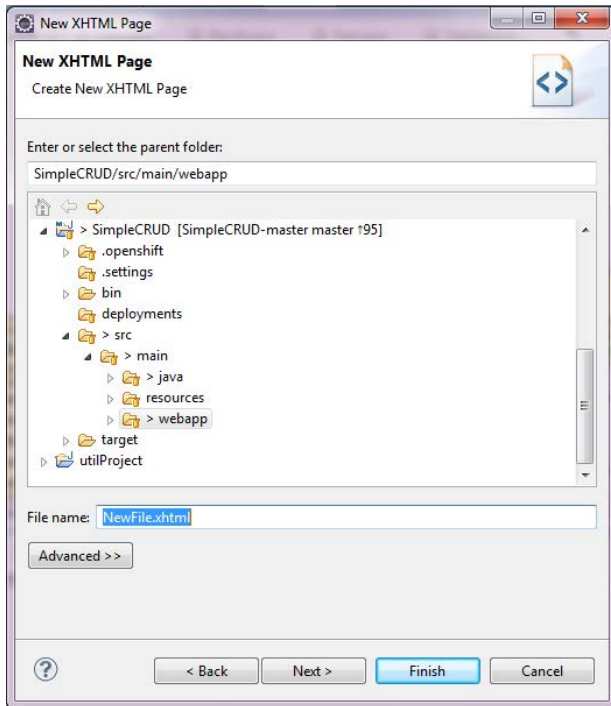


Рис. 3. Створення xhtml-сторінки

Для розгортання програми в середовищі Eclipse з контекстного меню проекту ііс були обрані опції вибрати Run As > Run On Server, як показано на рис. 4.

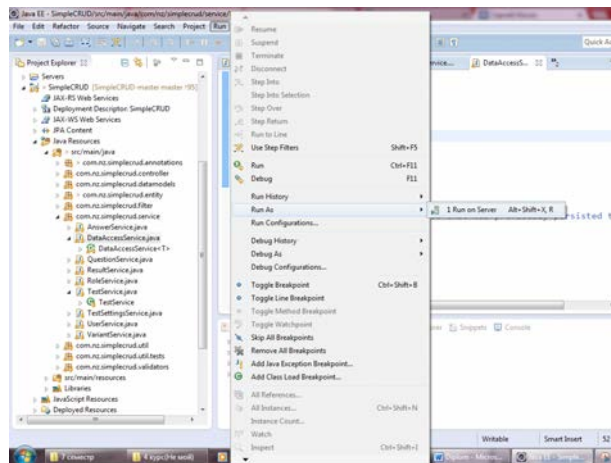


Рис. 4. Розгортання проекту на сервері

Після запиту Eclipse про сервер, на якому буде розгортання, треба вибрати екземпляр Jboss, який був створений раніше (рис. 5). Слід відкрити вікно Servers, що показує, що Web-проект був опублікований на сервері JBoss. Це відображено на рис. 6.

Після цього стало можливим викликати Web-проект у Web-браузері за адресою <http://localhost:8080/TestSystem>.

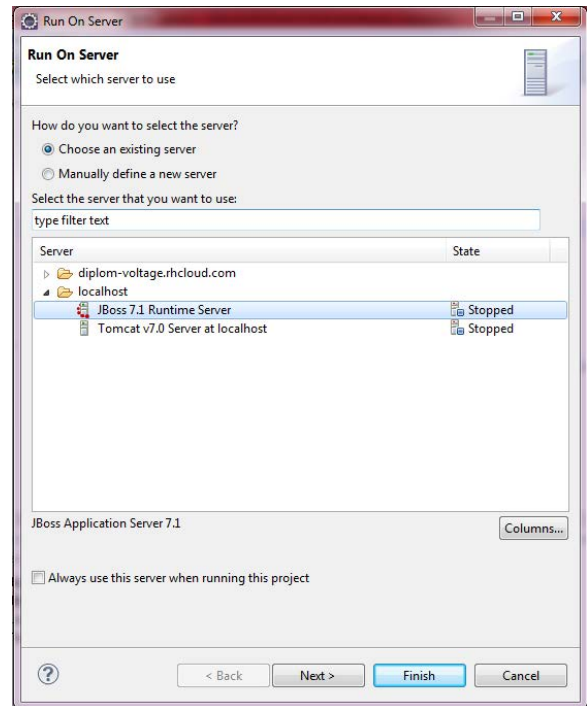


Рис. 5. Розгортання проекту на сервері

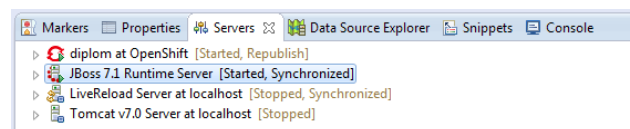


Рис. 6. Статус проекту на сервері

Таким чином, вибір засобів розробки є досить непростим завданням, в ході вирішення якого необхідно знайти той комплекс, який матиме широкі можливості для розробки та постачався в одному програмному продукті.

Eclipse легко інтегрується з базою даних MySQL, Web-сервером JBoss та з усіма іншими необхідними компонентами. Eclipse має багато інструментів, які дозволяють швидко скористатися стеком технологій Java EE.

5. Розміщення web-проекту на хостинг

Розміщення web-проекту системи управління дистанційною трудовою діяльністю виконавців ІТ-проектів на хостингу – це комплексний процес, який вимагає ретельної підготовки, налаштування та подальшої підтримки. Вибір відповідного типу хостингу залежить від вимог вашого проекту. Можливими варіантами можуть стати:

Загальний хостинг: підходить для невеликих проектів з обмеженими ресурсами. Декілька проектів ділять один сервер, що може призвести до зниження продуктивності за високого навантаження.

Віртуальний виділений сервер (VPS) – надає більше контролю та ресурсів. Проєкт розміщується на віртуальній машині із виділеними ресурсами.

Виділений сервер – це повністю виділений фізичний сервер для вашого проєкту, який підходить для великих проєктів з високими вимогами до ресурсів.

Хмарний хостинг – масштабоване рішення, яке дозволяє легко збільшувати або зменшувати ресурси в міру необхідності. Популярні провайдери включають Amazon Web Services (AWS), Google Cloud Platform (GCP) та Microsoft Azure.

Висновки. Таким чином, розробка технології програмного інструментарію для управління дистанційною трудовою діяльністю виконавців ІТ-проєктів є складним і важливим процесом, який має великий потенціал для підвищення ефективності роботи команд і організацій, що працюють у віддаленому форматі. Розробка технології повинна передбачати інтеграцію з існуючими корпоративними системами і популярними

інструментами для співпраці (CRM, ERP, календарі, системи документообігу тощо).

Після розгортання системи необхідно забезпечити постійну технічну підтримку, регулярні оновлення і адаптацію системи до нових викликів і технологій. Створення такого інструменту сприятиме підвищенню ефективності роботи віддалених команд, забезпеченню якісної комунікації, організації робочих процесів і підтримці високої продуктивності в умовах глобальних змін на ринку праці.

Науковим результатом дослідження є технологія розробки програмного інструментарію для управління дистанційною трудовою діяльністю виконавців ІТ-проєктів.

Практичним результатом роботи є рекомендації стосовно розробки програмної складової системи управління дистанційною трудовою діяльністю виконавців ІТ-проєктів.

Подальшим напрямком дослідження можуть стати оцінка ефективності використання програмного інструментарію для управління дистанційною трудовою діяльністю виконавців ІТ-проєктів.

Список літератури:

1. Schön, E., Thomaschewski, J. and José, M. Agile Requirements Engineering: A systematic literature review, *Computer Standards and Interfaces*, 2017, № 49, pp. 79–91. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.csi.2016.08.011>
2. Starkova, O., Bondarenko, D., Hrabovskyi, Y. Providing software support for economic analysis. *Technology Audit and Production Reserves*, 2023, № 5 (2 (73)), С. 34–39.
3. Hrabovskyi, Y., Bondarenko, D., Ushakova, I. Usage of adaptive design technologies for the designing of a web application for analysis of the efficiency of solar panels. *Вчені записки ТНУ імені В.І. Вернадського. Серія: Технічні науки*, 2024, Т. 35 (74), № 1, С. 118–126.
4. Назарова С. О. Принципові зміни якості інформаційних продуктів, які містять мультимедійні технології. *Управління розвитком* №3(181), 2015 р. – С. 164–172.
5. Martin, R. Twenty challenges for innovation studies. *Science and Public Policy*, 2016, № 43(3), p. 432–450.
6. Назарова С. О., Пушкар О. І. Проєктування системи E-LEARNING дистанційних працівників. *Економіка розвитку*, № 4 (80), 2016, С. 71–80.
7. Khoroshevska I., Khoroshevskiy O., Hrabovskyi Y., Lukyanova V., Zhytlova I. Development of a multimedia training course for user self-development. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 2024, № 2(2 (128)), P. 48–63.
8. Hood, N. *Quality in MOOCs : Surveying the terrain*. Burnaby: Commonwealth of Learning, 2016, 40 p.
9. Hrabovskyi, Y., Kots, H., Szymczyk, K. Justification of the innovative strategy of information technology implementation for the implementation of multimedia publishing business projects. *Proceedings on Engineering Sciences*, 2022, № 4(4), pp. 467–480. DOI: <https://doi.org/10.24874/PES04.04.008>
10. Ushakova, I., Hrabovskyi, Ye. Methodology for developing an information site with Workflow support for publishing articles. *Development management*. 2022. № 20(3). P. 20–28. DOI: 10.57111/devt.20(3).2022.20-28
11. Ushakova, I., Hrabovskyi, Y., Bondarenko, D. Modeling and selection of a distance learning system for a higher education institution based on the method of hierarchy analysis using the DSS. *Вчені записки ТНУ імені В.І. Вернадського. Серія: Технічні науки*. 2023. Т. 34(73). № 2. С. 246–253.

Nazarova S.O., Nazarov D.L. TECHNOLOGY FOR DEVELOPING SOFTWARE TOOLS FOR MANAGING REMOTE WORK ACTIVITIES EXECUTORS OF IT PROJECTS

The article proposes the creation and practical implementation of technology for developing software tools for managing remote labour activity executors of IT projects. The object of research in this article is the process of using the software component to develop a system for managing remote labour activity executors of IT projects. The practical significance of this study is to develop recommendations for the development

of the software component of the system for managing remote labour activity executors of IT projects. The article provides a list and a detailed description of the main stages of the technology for developing software tools for managing remote labour activity. In this paper, the configuration of the necessary components for the development of software tools for managing remote labour activity is carried out on the basis of using the Eclipse environment. The article describes the mechanism for establishing a connection to the database in order to create and fill in all the necessary tables using Eclipse. Using the Eclipse toolkit, it is proposed to create a Java Persistence API mapping that simplifies the data access code. In this article, the functioning of the web server and auxiliary components is proposed to be carried out using the JBossTools software package. A list of the main entities that can be part of the database of a remote labour management system is proposed. The article creates a general architecture of the service layer of the software toolkit for managing remote labour activity. In this paper, it is recommended to use the JSF framework based on the MVC pattern for the remote labour management system. The article presents the results of developing a Web project with MVC architecture. This paper analyses the advantages of the Eclipse environment in terms of the availability of tools that allow you to quickly use the Java EE technology stack, as well as in terms of comfortable integration with the MySQL database, JBoss Web server and all other necessary components. The article presents a list of possible hosting options for hosting a web project of a remote labour management system. The scientific result of the study is the technology for developing software tools for managing remote labour activity executors of IT projects.

Key words: *remote work, technology, software tools, architecture, web project, Eclipse.*

Нечипоренко В.А.

Національний технічний університет України

«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

МЕТОДИ КЕРУВАННЯ БПЛА ІЗ ЗАСТОСУВАННЯМ КОМП'ЮТЕРНОГО ЗОРУ

У статті розглянуто актуальні проблеми впровадження систем надійного уникнення об'єктів для автономних безпілотних літальних апаратів (БПЛА), призначених для навігації в густонаселених середовищах. Проаналізовано сучасні методи та підходи до керування БПЛА із застосуванням комп'ютерного зору, що дозволяє уникати перешкод, використовуючи дані зображень як основне джерело інформації. Описано вплив технологій штучного інтелекту (ШІ) на розвиток БПЛА, зокрема використання генеративних змагальних мереж (GAN) для автоматизації проектування оптимальних конструкцій, а також навчання з підкріпленням (RL) для покращення стабільності польоту та ефективності маневрування. Розглянуто застосування генеративних алгоритмів для підвищення точності роботи датчиків БПЛА та використання згорткових нейронних мереж (CNN) для розпізнавання об'єктів і навігації. Акцентовано на важливості оптимізації алгоритмів управління росл БПЛА, які забезпечують координацію дій у реальному часі.

Проаналізовано архітектуру систем керування БПЛА, включаючи автономні та неавтономні системи керування, а також особливості стабілізації руху. Розглянуто методи компенсації помилок інерціальних навігаційних систем (ІНС), зокрема за допомогою фільтра Калмана та рекурентних нейронних мереж (LSTM – RNN), що є важливими для забезпечення точності траєкторії польоту. Особливу увагу приділено проблемам, пов'язаним з використанням візуальних систем в умовах низької видимості, та перевагам багатосенсорних систем, які поєднують дані з різних джерел, таких як камери, лідари, радары та тепловізори, для забезпечення надійного виявлення об'єктів.

Окреслено перспективи подальших досліджень у напрямку вдосконалення систем керування БПЛА, зокрема оптимізації обчислювальних ресурсів, удосконалення алгоритмів компенсації помилок, інтеграції багатосенсорних систем та адаптації до реальних умов експлуатації. Запропоновано вивчення можливостей застосування ШІ для підвищення надійності та ефективності автономних БПЛА у складних умовах, що сприятиме розширенню сфер їх використання та підвищенню ефективності функціонування у різних середовищах.

Ключові слова: БПЛА, управління БПЛА, комп'ютерний зір, оминання перешкод, регулятори, методи керування БПЛА, нейронні мережі (CNN), рекурентні нейронні мережі (LSTM – RNN), навчання з підкріпленням (RL), інерціальні навігаційні систем (ІНС), генеративні змагальні мереж (GAN).

Постановка проблеми. Впровадження системи надійного уникнення об'єктів має вирішальне значення для роботи автономних літальних апаратів, призначених для навігації в густонаселених середовищах. Безпілотні літальні апарати (БПЛА) є самокерованою платформою, яка повинна покладатися на різні типи датчиків для автономної навігації. Системи бачення є одним з варіантів вирішення проблеми уникнення перешкод шляхом використання даних зображень як джерела точної інформації. Відеозображення показали здатність надавати цінну інформацію для більш важливих завдань, як-от уникнення зіткнень. Комп'ютерний зір зараз активно застосовується в робототехніці та автономних транспортних засобах.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Досягнення сучасного штучного інтелекту (ШІ) відкрили

нові можливості для розробки та використання безпілотних літальних апаратів (БПЛА). До основних категорій ШІ належать машинне навчання, нейронні мережі та алгоритми оптимізації. Оптимізаційні алгоритми можна використовувати для розв'язання багатьох завдань, пов'язаних із поліпшенням функціональності та ефективності БПЛА.

Одна з галузей, де ШІ може бути використаний для розробки БПЛА, – генеративне проектування. Генеративні інверсні мережі (GAN) можуть бути використані для автоматизації процесу створення оптимальної конструкції безпілотника. Процес створення оптимальної конструкції безпілотника, що враховує особливі вимоги до аеродинаміки, ваги і міцності, можна автоматизувати. Це не тільки спрощує процес розробки, а й сприяє впровадженню інновацій у конструкцію БПЛА [1].

Іншою важливою технологією, яку використовують під час проектування БПЛА, є навчання з підкріпленням (RL). Навчання з підкріпленням (RL) – ще одна важлива технологія, яка використовується в БПЛА, особливо для поліпшення стабільності польоту та ефективності маневрування; за допомогою RL безпілотник може навчитися знаходити оптимальні параметри управління. Безпілотник може навчатися в режимі реального часу, щоб знайти оптимальні параметри управління, адаптуючись до мінливих умов навколишнього середовища [2] [3].

Використання генеративних алгоритмів також може значно підвищити стабільність роботи датчиків БПЛА. Завдяки генеративному доповненню даних ШІ може створювати реалістичні тестові сценарії для калібрування датчиків і досягати більш високої точності даних у реальних умовах польоту [4].

У галузі комп'ютерного зору згорткові нейронні мережі (CNN) використовують для обробки та інтерпретації зображень і відео з камер БПЛА. Це дає змогу виконувати такі складні завдання, як розпізнавання об'єктів, відстеження цілей і навігація, без участі людини [5] [6].

Алгоритми управління роєм, такі як роїння частинок (PSO), дають змогу координувати поведінку кількох БПЛА, імітуючи природні процеси соціальної взаємодії, як, наприклад, у зграї птахів або риб. Це забезпечує ефективний розподіл завдань між безпілотниками, оптимізацію маршрутів і підвищення загальної ефективності польотів дронів. Завдяки використанню алгоритмів оптимізації та машинного навчання зграї дронів можуть адаптуватися до мінливих умов у режимі реального часу, забезпечуючи високу стабільність і надійність виконання завдань [7] [8].

Постановка завдання. Аналіз існуючих методів та підходів з керування БПЛА із застосуванням комп'ютерного зору та визначення можливих напрямків із подальшого їх удосконалення.

Виклад основного матеріалу. Великі дані та аналітика сприяють швидкому прийняттю рішень пілотами БПЛА. Вони засновані на аналізі величезних обсягів даних з різних джерел. Алгоритми машинного навчання, особливо методи глибокого навчання, можуть обробляти й аналізувати величезні обсяги даних і надавати пілотам безпілотників важливу інформацію в режимі реального часу [9] [10].

Використання ШІ також відкриває шлях до автономного прийняття рішень БПЛА. Складні алгоритми машинного навчання дають змогу дро-

нам самостійно визначати маршрути, орієнтуватися, ухилятися від перешкод і виконувати пошуково-рятувальні та сільськогосподарські завдання безпосереднього контролю з боку оператора. Це підвищує ефективність використання БПЛА у важкодоступних або небезпечних районах [11].

Архітектура безпілотного літального апарата може змінюватися залежно від вимог і завдань. Як показує досвід розроблення безпілотних літальних апаратів, в управлінні БПЛА є два основні елементи: перший – виконавчий елемент, тобто сам планер із силовою установкою та кермовим механізмом, та другий – командний елемент, тобто елемент управління та моніторингу літального апарата. Саме він ставить завдання на політ, ухвалює рішення про необхідність зміни програми польоту і коригує рух літального апарата в разі відхилення від заданої траєкторії [12].

Найбільші складнощі виникають під час розроблення системи керування. Це пов'язано з тим, що БПЛА має виконувати завдання в умовах автономного польоту, а отже, повинен мати повністю функціонально замкнуту систему управління (СУ). У зв'язку з цим СУ повинна вирішувати такі завдання: – стабілізація параметрів руху об'єкта відносно зовнішніх перешкод різної природи – аналіз зовнішньої інформації бортовими засобами та визначення пріоритетних цілей відповідно до поставлених перед БПЛА завдань, оптимізація часу руху та витрат ресурсів БПЛА з метою зниження розрахунку траєкторії руху, контроль правильності витримування траєкторії, забезпечення бортовими засобами відмовостійкості керованого об'єкта чи компенсація змін його характеристик, виконання бортовими засобами математичних операцій. Для того щоб наочно уявити рух моделі квадрокоптера, необхідно вибрати координати положення. Модель квадрокоптера визначається рамою корпусу B і землею E , як показано на (рисунку 1). Нехай вектор $(x\ y\ z)'$ – положення центру ваги квадрокоптера, а вектор $(u\ v\ w)'$ – лінійна швидкість у системі координат. Вектор $(p\ q\ r)'$ – кутова швидкість квадрокоптера, m – повна маса, g – гравітаційне прискорення, l – відстань від центру кожного ротора до центру ваги [14].

Якщо рух літального апарата не потрібно підтримувати точно за заданою траєкторією, то контролюється тільки кутовий рух.

Управління кутовими рухами забезпечує цілком певне положення БПЛА в просторі щодо вектора швидкості центру мас. Управління рухом центру мас забезпечує політ за найкращою (оптимальною) траєкторією, наприклад, за найкорот-

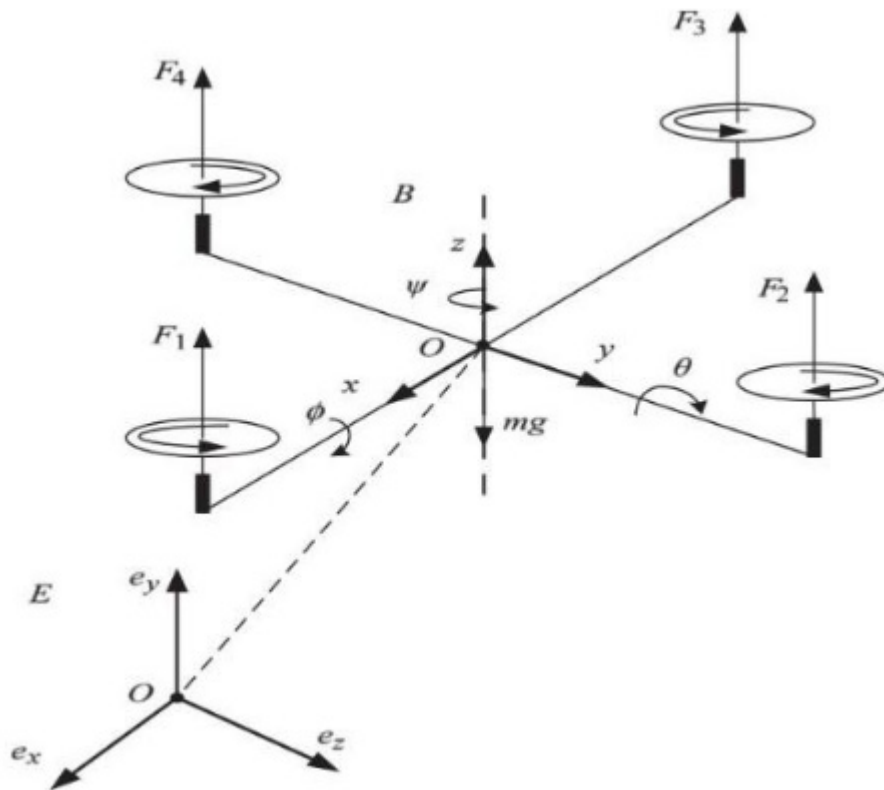


Рис. 1. Базова модель квадрокоптера [14]

шим шляхом за найкоротший час. Таким чином, управління польотом БПЛА зводиться до управління параметрами його руху: кутовими координатами, кутовими швидкостями і прискореннями, лінійними координатами (дальністю, висотою, бічним переміщенням) тощо. Існуючі СК поділяють на автономні та неавтономні. Крім того, в окрему групу можуть бути виділені комбіновані СК [15]. Особливістю автономних є те, що сигнали керування рухом виробляються апаратурою, повністю розташованою на борту, причому ця апаратура після запуску не отримує жодної інформації з пункту керування. Автономні СК діють за заздалегідь визначеною програмою.

Під час використання автономних систем існує два способи отримання керуючих сигналів. Перед запуском можна розрахувати, як мають змінюватися в часі основні параметри руху БПЛА (швидкість, кут тощо), що визначають траєкторію.

Отримана функція часу вводиться в спеціальний блок управління у вигляді заданого значення або програми. Після запуску відповідний пристрій безперервно змінює поточні (фактичні) значення цих параметрів під час польоту БПЛА.

Система керування порівнює розрахункові значення параметрів із поточними і в разі розбіжностей формує відповідні керувальні сигнали. Якщо

БПЛА оснащено пристроєм, здатним безперервно вимірювати координати в просторі, автономне керування здійснюється інакше. Координати, отримані від апаратури, автоматично вводяться в бортовий комп'ютер, який розраховує величину керуючих сигналів за заздалегідь заданою програмою. Таким чином, конкретні траєкторії не задаються заздалегідь, а розраховуються в кожному конкретному випадку залежно від поточних координат. Передбачається, що координати об'єкта попередньо завантажені в обчислювальний пристрій. На такі СК не впливають штучно створені перешкоди. Це їхня головна перевага. Крім того, ці системи БПЛА з великою дальністю польоту [16]. Визначення власних координат повітряним судном відбувається за стандартної роботи приймача супутникової навігаційної системи (СНС). Під час переналаштування приймача можна збільшити частоту, на якій він визначає свої координати. На практиці збільшення частоти не підвищує точність визначення координат, оскільки швидкість зміни координат накладає обмеження на маневреність БПЛА. Характер руху мало змінюється протягом секунди, і положення БПЛА може бути досить точно розраховано на основі його попереднього положення, динаміки польоту і поточних маневрів. У реальності завдання

полягає не тільки в тому, щоб знати, де перебуває об'єкт і в який час, а й у тому, щоб розробити відповідну реакцію залежно від його положення. Тому ситуацію можна розділити на три традиційні категорії. Перша – найпростіший випадок моніторингу. Завдання системи – фіксувати положення об'єкта з прив'язкою до часу; друга – продовження першої. У цьому випадку, крім моніторингу, система генерує відповідну реакцію (сигнал тривоги, серію обчислювальних процедур або внутрішні команди). У цьому випадку час, необхідний для розроблення та виконання реакції, мізерно малий порівняно з дискретним характером місця розташування об'єкта. Третя категорія – це передача даних, обчислених у другому випадку, на повітряне судно. Наприклад, для коригування руху. У цьому випадку враховується час, що витрачається літаком на передачу координат у точку спостереження, видачу команди і повернення команди на літак.

Наступний метод управління називається навігацією (Рис. 2) [17], за якого управління БПЛА здійснюється не шляхом надсилання команд, а шляхом встановлення шляхових точок відносно земної поверхні. Цей метод управління вимагає

передачі частини обчислень від контрольного пункту до БПЛА. Усі розрахунки з виявлення відхилень від заданої траєкторії виконуються на літаку. Таким чином, навантаження на радіоканали додатково знижується. По радіоканалу передаються тільки зміни в навігаційній програмі (відхилення від заздалегідь спланованого маршруту). У цьому разі в разі виникнення будь-яких відхилень від заданої траєкторії навігаційний обчислювач здатний сам, без участі зовнішнього пункту управління, виробити набір команд для корекції руху. Однак таке керування підвищує вимоги до апаратури навігаційного обчислювача (до пам'яті, продуктивності та програмного забезпечення).

У такому разі до складу бортового комплексу навігації та керування мають входити: – приймач супутникової навігації, що забезпечує приймання навігаційної інформації від системи GPS; – система інерціальних датчиків, що забезпечує визначення орієнтації та параметрів руху БПЛА; – система повітряних сигналів, що забезпечує вимірювання висоти і повітряної швидкості; – апаратура лінії передачі даних, різні види антен, призначені для виконання завдань. Бортова система навігації та управління забезпечує: – політ за заданим маршрутом (завдання

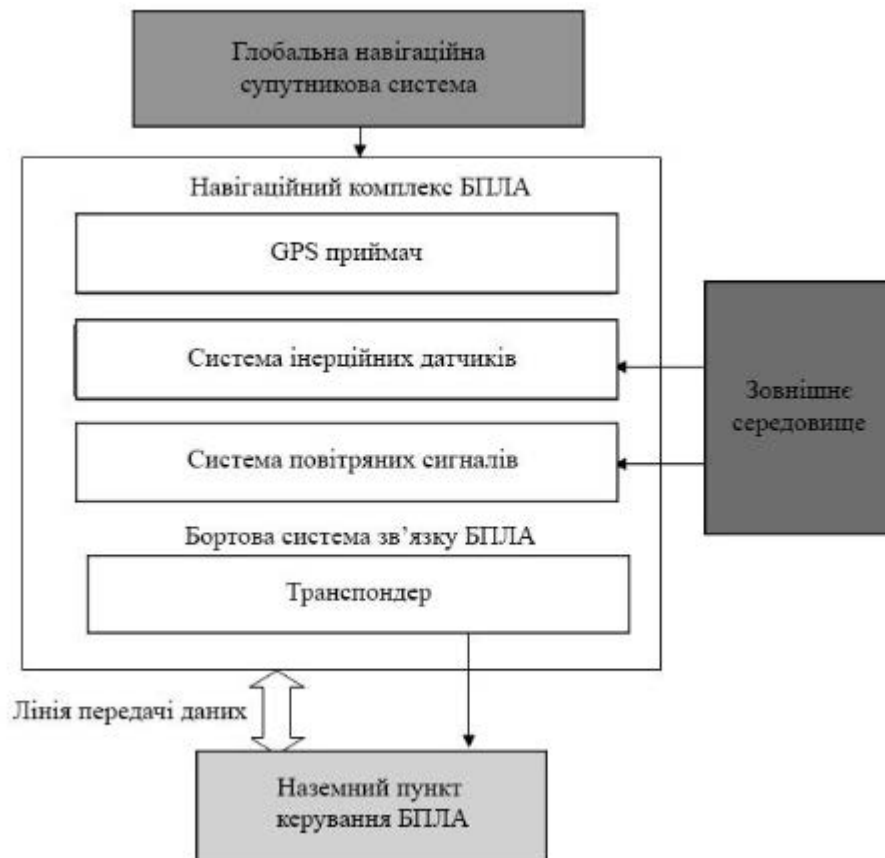


Рис. 2. Структура навігаційного методу керування БПЛА [17]

маршруту проводиться із зазначенням координат і висоти поворотних пунктів маршруту); – зміну маршрутного завдання або повернення в точку старту за командою з наземного пункту управління; – обліт зазначеної точки; – автосупровід обраного об'єкта; – стабілізацію кутів орієнтації БПЛА; – підтримання заданих висот і швидкості польоту (шляхової або повітряної); – збір і передачу телеметричної інформації про параметри польоту і роботу цільового обладнання; – програмне управління пристроями цільового обладнання. Бортова система зв'язку: – функціонує в дозволеному діапазоні радіочастот; – забезпечує передавання даних з борту на землю і з землі на борт. Дані, що передаються з борту на землю: – параметри телеметрії; – потокове відео- і фотозображення. Дані, що передаються на борт, містять: – команди керування БПЛА; – команди керування цільовою апаратурою. Інформацію, отриману з БПЛА, потрібно класифікувати залежно від ступеня загрози. Класифікація проводиться оператором, або безпосередньо бортовим комп'ютером (автопілотом) БПЛА. У другому випадку програмне забезпечення комплексу містить елементи штучного інтелекту, і потрібно виробити кількісні критерії та градації рівнів загрози. Такі критерії можуть бути сформульовані шляхом експертних оцінок і формалізовані таким чином, щоб мінімізувати ймовірність помилкового сигналу тривоги [18].

Визначення даних позиціонування для БПЛА зазвичай ґрунтується на використанні вбудованих МЕМС безплатформної інерціальної навігаційної системи на базі мікроконтролера Arduino. Алгоритм виконання функції керування маршрутом польоту в разі втрати сигналу глобальної супутникової системи описується з використанням даних від МЕМС-датчиків і модуля глобальної системи позиціонування (GPS) методом синтезованого нейромережевого алгоритму [19], що здебільшого базується на алгоритмі фільтрації Калмана [20].

Інерціальні навігаційні системи на основі МЕМС-датчиків є чутливими, що призводить до помилок в оцінці кутової швидкості, визначенні курсу, тяга становить $\Delta_{\omega} \in \{0.66 \dots 1.16\} \text{ } ^\circ/\text{s}$ [21], без будь-якої поправки на GPS-навігацію, похибка МЕМС інерційних навігаційних систем збільшується з часом. Структура моделі помилок МЕМС-датчиків БНС, особливо через нестабільність окремих компонентів у період кореляції, близький до періоду зникнення сигналу ГСП (від 10 с до 300 с), важлива для правильного керування траєкторією польоту БПЛА [21].

У наукових дослідженнях [22] було показано ефективні способи компенсації помилок МЕМС

в інерціальних навігаційних системах на основі рекурентних нейронних мереж LSTM – RNN. Однак було встановлено, що структура нейронної мережі ускладнюється в процесі польоту БПЛА, що створює додаткове обчислювальне навантаження на мікрокомп'ютер навігаційної системи.

У роботі [23] представлено метод інерціальної навігації, що ґрунтується на поліпшеному фільтрі Калмана в поєднанні з алгоритмом зворотного поширення помилок нейронної мережі для мінімізації обчислювального навантаження. Запропонований покращений фільтр Калмана на основі нейронних мереж показав кращі результати при обчисленні оцінки навігаційних параметрів (кута початкового зсуву), проте дана модель не враховує залежність помилки БНС від кроку $t-1$, на якому не визначено характеристики поточного шуму по відношенню до попередніх.

Автори роботи [24] запропонували вдосконалений метод фільтрації Калмана з використанням нейронних мереж з радіальними базисними функціями для зменшення впливу динамічного середовища на визначення траєкторії БПЛА після втрати сигналу GPS. Результати показали, що запропонований метод дає змогу зменшити вплив динамічних варіацій шумових характеристик БНС БПЛА після втрати сигналу GPS, але це призводить до збільшення обчислювальної складності відносно часу роботи і може бути використаний, коли вага та розміри навігаційної системи БПЛА не обмежені.

У роботі [25] було запропоновано метод фільтрації вибірок вихідних даних гіроскопа на основі алгоритму генетичного нейромережевого пошуку нейронної архітектури NAS – RNN. Результати показали, що стандартне відхилення показників гіроскопа MEMS зменшилося за використання алгоритму NAS-RNN порівняно з відхиленням за використання LSTM-RNN, однак використання алгоритму NAS-RNN потребувало більше часу на пошук і навчання адаптивної моделі нейромережевої структури навігаційної системи.

Одним із відомих методів автоматичного машинного навчання є агностичний мережевий алгоритм вибору нейронної архітектури WANN [26]. На відміну від традиційного алгоритму WANN, замість налаштування вагових коефіцієнтів він використовує варіаційний процес, що ґрунтується на генетичних методах, для вибору архітектури нейронної мережі зі спільними ваговими коефіцієнтами, тим самим адаптуючи вибрану архітектуру нейронної мережі до розв'язання цільової задачі. Час, необхідний для її адаптації до розв'язання цільового завдання, скорочується.

Системи візуального визначення та подолання перешкод для БПЛА

Візуальне планування – це розширення методів планування та обходу перешкод для завдань, де джерелом інформації є візуальна або скануюча система з використанням відеокамер. Більша частина досліджень у цій галузі присвячена вивченню таких проблем, як вибір оптимальних міток для локалізації робота [27], визначення місця розташування за наявними візуальними орієнтирами [28], відстежування та уточнення місця розташування за візуальними орієнтирами [29]. Розглядалися такі дослідження, в яких для виділення перешкод із фону використовується область контролю безпосередньо перед роботом, яка порівнюється з фоном [30].

У статті [31] розглядається проблема моделювання роботи оптикоелектронної системи БПЛА для завдання налагодження алгоритмів пошуку та ідентифікації навігаційних орієнтирів. Пропонується використовувати віртуальний полігон, що формується на основі даних, взятих із відкритих джерел (Google Earth, Shuttle radar topographic mission) для моделювання відеопотоку даних, що одержуються з камери БПЛА. При розробці використано бібліотеку OpenGL, що значно спростило вирішення задач візуалізації сцен, а також процес моделювання погодних умов та умов освітлення.

В статті [32] розглянуто методи цифрової обробки відеозображень апаратурою безпілотного літального апарата. Здійснено огляд, систематизацію та аналіз існуючих методів і алгоритмів цифрової обробки зображень, досліджено практичні та теоретичні проблеми їх використання. Ряд робіт присвячено візуальному плануванню на основі нечіткої логіки.

В роботі [33] розроблено нечіткий планувальник для побудови маршруту мобільного робота. Робота нечіткого планувальника є циклічною та включає послідовність наступних дій: виявлення перешкод відповідно секторами поділу навколишнього простору; вибір поведінки мобільного робота; здійснення керуючих параметрів руху мобільного робота (напрямок, швидкість) на основі обраної поведінки.

В статті [34] розроблено гібридну моделі візуального планування з використанням нейронної мережі та нечіткого регулятора. Автор статті за допомогою нейронної мережі отримав функції належності та базу правил для нечіткого регулятора, який в свою чергу і керував процесом руху. Перевагою цього підходу є те, що формується мінімальна кількість функцій належності та пра-

вил, тож швидкість виконання алгоритму нечіткої логіки на контролері збільшується.

В статті [35] виконано порівняння нечіткого алгоритму, нейро-нечіткого алгоритму, гібридного алгоритму нечіткої логіки і генетичного алгоритму та гібридного методу рою частинок і нечіткого алгоритму. Результати показали, що нечіткий алгоритм краще за всіх інших з точки зору мінімізації енергії повороту. Гібридний алгоритм нечіткої логіки показав найкращі результати для часу наближення до цілі. Гібридний метод рою частинок і нечіткого алгоритму та нейро-нечіткий алгоритм виявились приблизно однаковими за характеристиками. В результаті усіх експериментів автори зробили висновок, що нечіткий регулятор виявить себе найкращим чином в реальних умовах. При роботі в реальних умовах треба враховувати наявність несприятливих погодних умов (дощ, сніг, туман) та умов освітлення, в тому числі, наявність сонячних відблисків.

Щодо навігації БПЛА при несприятливих погодних умовах на сьогоднішній день запропоновано алгоритми обробки зображень, які мають певні переваги та недоліки [36, 37, 38]. Але недостатньо розроблені методи боротьби з сонячними відблисками або відблисками, що надходять від іншого джерела освітлення.

На сьогодні є проблема ефективного виявлення об'єктів в умовах низької видимості є актуальною для багатьох галузей, зокрема, для автоматизованих систем керування безпілотними літальними апаратами (БПЛА). Низька видимість може бути спричинена різними факторами: недостатнім освітленням, туманом, дощем, снігом, а також димом або пилом. Для вирішення цієї проблеми розробляються різноманітні підходи, які можна об'єднати в кілька основних напрямків.

Використання багатосенсорних систем є одним із найефективніших підходів до вирішення проблеми виявлення об'єктів в умовах низької видимості. Комбінуючи дані від різних сенсорів, можна отримати більш повну і точну картину навколишнього середовища, ніж при використанні лише одного сенсора.

В багатосенсорних системах використовують основні типи сенсорів, як камери, лидари, радари, тепловізори, Інерціальні вимірювальні блоки (ІВБ). Камери використовуються для отримання візуальної інформації про навколишнє середовище. Можуть бути монокулярними, стереоскопічними або багатоканальними. Кольорові камери дозволяють отримати інформацію про колір об'єктів, що може бути корисним для їхньої класифікації.

фікації. Чорно-білі камери більш чутливі до низьких рівнів освітлення. Лідари використовують лазерне сканування для створення тривимірних моделей навколишнього середовища. Забезпечують високу точність вимірювання відстаней до об'єктів, незалежно від умов освітлення. Радари випромінюють радіохвилі для виявлення об'єктів. Мають високу проникаючу здатність, що дозволяє виявляти об'єкти крізь перешкоди (наприклад, туман, дощ). Дія тепловізорів полягає у виявленні об'єктів за їхнім тепловим випромінюванням. Ефективні для виявлення людей і тварин в умовах низької видимості. Що до інерціальних вимірювальних блоків, то їх використовують для вимірювання лінійного прискорення і кутової швидкості. Дані ІВБ використовуються для оцінки власного руху системи і компенсації його впливу на результати вимірювань інших сенсорів. Важливу роль у розвитку систем виявлення об'єктів відіграє також використання підсилювального навчання. Цей підхід дозволяє навчати агентів приймати оптимальні рішення в динамічних середовищах. Наприклад, агент може навчатися вибирати оптимальні параметри сенсорів і алгоритмів обробки даних залежно від конкретних умов. Це дозволяє створювати більш адаптивні та робастні системи.

Висновки. У цій оглядовій статті було розглянуто різні аспекти навігаційних і керувальних систем безпілотних літальних апаратів (БПЛА), а також методи виявлення об'єктів в умовах низької видимості.

1. Навігаційні системи БПЛА:

– Розглянуто структуру бортового комплексу навігації та керування, яка включає супутникову навігацію, інерціальні датчики, систему повітряних сигналів, апаратуру передачі даних і антенні системи.

– Особливу увагу приділено використанню МЕМС безплатформної інерціальної навігаційної системи. Обговорено проблеми, пов'язані з помилками інерціальних датчиків та їхнім впливом на точність навігації.

– Розглянуто методи компенсації цих помилок, включаючи використання фільтра Калмана, рекурентних нейронних мереж (LSTM – RNN) і гібридних методів фільтрації з використанням нейронних мереж.

2. Системи візуального планування та виявлення перешкод:

– Описано методи візуального планування та обходу перешкод, що ґрунтуються на обробці

даних з камер, та проблеми, пов'язані з їх використанням.

– Розглянуто використання багатосенсорних систем (камери, лідари, радари, тепловізори, інерціальні вимірювальні блоки) для підвищення точності виявлення об'єктів в умовах низької видимості.

– Обговорено роль підсилювального навчання в адаптації систем виявлення об'єктів до динамічних умов.

3. Алгоритмічні рішення:

– Проаналізовано методи нейронних мереж, зокрема NAS – RNN і агностичний мережевий алгоритм вибору архітектури (WANN), які використовуються для підвищення точності навігаційних систем.

– Розглянуто методи цифрової обробки зображень і нечіткі алгоритми, які можуть бути ефективними для візуального планування та керування БПЛА в складних умовах.

Таким чином, подальший розвиток і дослідження в цій галузі повинні бути зосереджені на вирішенні таких ключових завдань, як оптимізація обчислювальних ресурсів, удосконалення методів компенсації помилок, інтеграція багатосенсорних систем та адаптація до реальних умов експлуатації. Це дозволить забезпечити більш ефективне та надійне функціонування БПЛА в різних умовах та розширити сфери їх застосування.

Аналіз останніх досліджень також надає важливі вказівки щодо напрямків подальших досліджень, які можуть включати розробку нових методів оптимізації обчислювальних ресурсів, впровадження більш ефективних алгоритмів систем, а також дослідження методів інтеграції багатосенсорних систем для покращення точності виявлення перешкод. Крім того, важливо досліджувати можливості адаптації ШІ до реальних умов експлуатації, що дозволить підвищити надійність та ефективність роботи БПЛА у складних умовах.

На завершення, можна зробити висновок, що розвиток систем управління БПЛА, зокрема з використанням ШІ та багатосенсорних систем, є критично важливим для забезпечення їх ефективного використання в сучасному світі. Проте, для досягнення максимального потенціалу цих технологій необхідно продовжувати дослідження та вдосконалення існуючих методів.

Список літератури:

1. J. Bright, R. Suryaprakash, S. Akash та A. & Giridharan, «Optimization of quadcopter frame using generative design and comparison with DJI F450 drone frame,» в IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 2021.
2. Y. Kryvenchuk, D. Petrenko, D. Cichoń, Y. Malynovskyy та T. Helzhynska, «Selection of Deep Reinforcement Learning Using a Genetic Algorithm,» в 6th International Conference on Computational Linguistics and Intelligent Systems (COLINS 2022), Gliwice, Poland, 12–13 May 2022.
3. Д. Петренко та Ю. Кривенчук, «Система стабілізації положення дрону з використанням навчання з підкріпленням,» Вісник Хмельницького національного університету. Серія: Технічні науки, 2022.
4. Petrenko, Y. Kryvenchuk та V. Yakovyna, «Enhancing Data Discretization for Smoother Drone Input Using GAN-Based IMU Data Augmentation,» Drones, т. 7, № 7, p. 463, 2023.
5. J. A. Cocomo-Ortega та J. Martinez-Carranza, «A cnn based drone localisation approach for autonomous drone racing,» в 11th International Micro Air Vehicle Competition and Conference, 2019.
6. M. A. Arshad, S. H. Khan, S. Qamar, M. W. Khan, I. Murtza, J. Gwak та A. Khan, «Drone navigation using region and edge exploitation-based deep CNN,» IEEE Access, т. 10, pp. 95441-95450, 2022.
7. L. Zheng, G. Xu та W. Chen, «Using Improved Particle Swarm Optimization Algorithm for Location Problem of Drone Logistics Hub,» в Computers, Materials & Continua, 2024.
8. T. Xiong, F. Liu, H. Liu, J. Ge, H. Li, K. Ding та Q. Li, «Multi-drone optimal mission assignment and 3D path planning for disaster rescue,» Drones, т. 7, № 6, p. 394, 2023.
9. R. I. Da Silva, J. D. C. V. Rezende та M. J. F. Souza, «Collecting large volume data from wireless sensor network by drone,» Ad Hoc Networks, № 138, p. 103017, 2023.
10. U. ur Rehman, T. Iqbal, S. Hussain, M. J. M. Cheema та F. B. A. Iqbal, «Drone and Robotics Roadmap for Agriculture Crops in Pakistan: A Review,» Environmental Sciences Proceedings, т. 23, № 1, p. 39, 2023.
11. Bogyrbayeva, T. Yoon, H. Ko, S. Lim, H. Yun та C. Kwon, «A deep reinforcement learning approach for solving the traveling salesman problem with drone,» Transportation Research Part C: Emerging Technologies, № 148, p. 103981, 2023.
12. Z. Zuo, C. J. Liu, Q.-L. Han, and J. Song (2022), “Unmanned aerial vehicles: Control methods and future challenges”, IEEE/CAA J. Autom. Sinica, vol. 9, no. 4, pp. 601–614. doi: 10.1109/JAS.2022.105410.
13. Z. Li, X. Ma, and Y. Li, “Robust trajectory tracking control for a quadrotor subject to disturbances and model uncertainties,” International Journal of Systems Science, vol. 51, no. 5, pp. 839–851, 2020, <https://doi.org/10.1080/00207721.2020.1746430>.
14. J. Xiong, E. Zheng, “Position and attitude tracking control for a quadrotor UAV”, ISA (Instrum Soc Am) Trans, 53 (3) (2014), pp. 725–731, doi: <https://doi.org/10.1016/j.isatra.2014.01.004>
15. O. Mechali, L. Xu, Y. Huang, M. Shi, and X. Xie (2021), “Observer-based fixed-time continuous nonsingular terminal sliding mode control of quadrotor aircraft under uncertainties and disturbances for robust trajectory tracking: Theory and experiment,” Control Engineering Practice, vol. 111, p. 104806, doi: <https://doi.org/10.1016/j.conengprac.2021.104806>.
16. B. J. Emran and H. Najjaran (2018), “A review of quadrotor: An underactuated mechanical system,” Annual Reviews in Control, vol. 46, pp. 165–180, doi: <https://doi.org/10.1016/j.arcontrol.2018.10.009>.
17. Ю. В. Іваненко, О. С. Ляшенко, Т. В. Філімончук Харківський національний університет радіоелектроніки, Харків, Україна “ОГЛЯД МЕТОДІВ КЕРУВАННЯ БЕЗПЛОТНИМИ ЛІТАЛЬНИМИ АПАРАТАМИ”
18. M. Campion, P. Ranganathan Prakash, S. Faruque (2019), “UAV swarm communication and control architectures: a review”, Journal of Unmanned Vehicle Systems, vol. 7.
19. Yimin Zhou, Jiao Wan, Zhifei Li, Zhibin Song.(2017). GPS/INS integrated navigation with BP neural network and Kalman filter. 2017 IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics (ROBIO), Date Added to IEEE Xplore: 26 March 2018. <https://doi.org/10.1109/ROBIO.2017.8324798>.
20. C. Sun, W. He, W. Ge, and C. Chang. (2017). Adaptive neural network control of biped robots. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems, Volume: 47, Issue: 2, 2017, 315–326. <https://doi.org/10.1109/TSMC.2016.2557223>.
21. Ding, S., Ma, G., Shi, Z. (2014). A rough RBF neural network based on weighted regularized extreme learning machine. Neural processing letters, vol. 40, no. 3, 245-260. View at: <https://link.springer.com/article/10.1007/s11063-013-9326-5>.
22. Gross, J., Gu, Y., Gururajan, S., et al. (2013). A comparison of extended kalman filter, sigma-point kalman filter, and particle filter in GPS/INS sensor fusion. AIAA Guidance, Navigation, & Control Conference. View at: <https://arc.aiaa.org/doi/10.2514/6.2010-8332>.
23. Tianjun Liu, Xinglong Tan, Jian Wang, Yipeng Ning. (2018). An optimal radial basis function neural network enhanced adaptive robust Kalman filter for GNSS/INS integrated systems in complex urban areas. Sensors 2018, 18 (9), 3091. <https://doi.org/10.3390/s18093091>.
24. Elsken Thomas, Metzen Jan Hendrik, Hutter Frank (2019). Neural architecture search: A Survey. Journal of Machine Learning Research. 20 (55), 1–21. View at: <https://www.jmlr.org/papers/volume20/18-598/18-598.pdf>.
25. Adam Gaier, David Ha. (2019). Weight agnostic neural networks. Submitted on 11 Jun 2019 (v1), last revised 5 Sep 2019 (this version, v2). View at: <https://arxiv.org/abs/1906.04358>.

26. Itay Hubara, Matthieu Courbariaux, Daniel Soudry, Ran El-Yaniv, Yoshua Bengio. (2018). Quantized neural networks: training neural networks with low precision weights and activations. *Journal of Machine Learning Research* 18, 1–30. View at: <https://jmlr.org/papers/v18/16-456.html>.
27. Burschka D., Geiman J., Hager G. Optimal landmark configuration for vision-based control of mobile robots [Text] // Proc. of 2003 IEEE ICRA, Taipei, Taiwan, Sept. 14–19, 2003. P. 3917–3922.
28. Hayet J.B., Lerasle F., Devy M. Visual Landmarks Detection and Recognition for Mobile Robot Navigation [Text] // Proc. of 2003 IEEE Conf. on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR'2003). Madison, Wisconsin, USA, 2003. V. II. P. 313–318.
29. Jurie F., Dhome M. Hyperplane Approximation for Template Matching [Text] // IEEE. Trans. on Pattern Analysis and Machine Intelligence. 2002. V. 24, №7. P. 996–1000.
30. Lourakis M. I.A., Orphanoudakis S. C. Visual Detection of Obstacles Assuming a Locally Planar Ground. [Text] // Technical Report FORTH-ICS, TR-207. 1997.
31. Ганченко В.В., Дудкин А.А., Инютин А.В., Поденок Л.П. Моделирование оптико-электронной системы беспилотных летательных аппаратов [Текст] // «Штучний інтелект» № 3. – 2010. – С. 453–461.
32. Проценко М.М. Аналіз методів цифрової обробки відеозображень апаратурою безпілотного літального апарата [Текст] // Вісник ЖДТУ № 3(62). – 2012. – С. 67–72.
33. Толкунова Ю.М. Розробка системи подолання перешкод для безпілотного літального апарату [Текст] // Національний університет «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка», Control, Navigation and Communication Systems № 2, – 2022. – С. 32–36.
34. Hossen, J. A. Modified Hybrid Fuzzy Controller for Real-Time Mobile Robot Navigation [Text] / J. Hossen, S. Sayeed, A.K.M. Parvez Iqbal // Procedia Computer Science. – 2015. – V.76. – P. 449–454.
35. Algabri, M. Comparative study of soft computing techniques for mobile robot navigation in an unknown environment [Text] / M. Algabri, H. Mathkour, H. Ramdane, M. Alsulaiman // Computers in Human Behavior. – 2015. – V.50. – P. 42–56.
36. Гонсалес Р. Цифровая обработка изображений [Текст] / Р. Гонсалес, Р. Вудс – М.: Техносфера, 2012. – 1104 с. 15.
37. Jia Z., Wang H., Caballero R.E. et al. A two-step approach to see-through bad weather for surveillance video quality enhancement [Text] // Machine Vision and Applications. 2012. V. 23. No. 6. P. 1059–1082.
38. Zelnic-Manor L., Machline M., & Irani M. Multi-body factorization with uncertainty: Revisiting motion consistency [Text] // International Journal of Computer Vision. 2006. V68(1). P. 27–41.

Nechyporenko V.A. UAV CONTROL METHODS USING COMPUTER VISION

The article considers the actual problems of implementing reliable object avoidance systems for autonomous unmanned aerial vehicles (UAVs) intended for navigation in densely populated environments. The article analyses modern methods and approaches to UAV control using computer vision, which allows avoiding obstacles using image data as the main source of information. The influence of artificial intelligence (AI) technologies on the development of UAVs is described, in particular, the use of generative adversarial networks (GANs) to automate the design of optimal structures, as well as reinforcement learning (RL) to improve flight stability and manoeuvring efficiency. The application of generative algorithms to improve the accuracy of UAV sensors and the use of convolutional neural networks (CNN) for object recognition and navigation are considered. The importance of optimising UAV swarm control algorithms that ensure real-time coordination is emphasised.

The architecture of UAV control systems is analysed, including autonomous and non-autonomous control systems, as well as the features of motion stabilisation. Methods of compensating for the errors of inertial navigation systems (INS), in particular, using the Kalman filter and recurrent neural networks (LSTM – RNN), which are important for ensuring the accuracy of the flight path, are considered. Particular attention is paid to the problems associated with the use of visual systems in low visibility conditions and the advantages of multi-sensor systems that combine data from different sources, such as cameras, lidars, radars and thermal imagers, to ensure reliable object detection.

The article outlines prospects for further research in improving UAV control systems, in particular, optimisation of computing resources, improvement of error compensation algorithms, integration of multi-sensor systems and adaptation to real operating conditions. It is proposed to study the possibilities of using AI to improve the reliability and efficiency of autonomous UAVs in difficult conditions, which will help to expand the scope of their use and increase the efficiency of their operation in different environments.

Key words: UAVs, UAV control, computer vision, obstacle avoidance, controllers, UAV control methods, neural networks (CNN), recurrent neural networks (LSTM – RNN), reinforcement learning (RL), inertial navigation systems (INS), generative adversarial networks (GAN).

Новак Д.С.

Київський національний університет технологій та дизайну

Олещенко Л.М.

Національний технічний університет України

«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Василенко В.М.

Національний авіаційний університет

Гуйда О.Г.

Таврійський національний університет імені В.І. Вернадського

Омецинська Н.В.

Таврійський національний університет імені В.І. Вернадського

РОЗРОБКА ПРОГРАМНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ДЛЯ РОЗПІЗНАВАННЯ СИМВОЛІВ КРЕДИТНИХ КАРТОК МОВОЮ PYTHON

Робота присвячена розробці програмного забезпечення для автоматизованого розпізнавання символів на кредитних картках за допомогою мови програмування Python. Актуальність теми обумовлена стрімким зростанням обсягів електронних платежів, що потребує вдосконалення технологій обробки фінансової інформації та підвищення рівня безпеки під час проведення транзакцій. У сучасних умовах, коли швидкість і точність обробки даних відіграють вирішальну роль, автоматизація процесу зчитування інформації з кредитних карток є надзвичайно важливою.

Основною метою роботи є створення ефективного та надійного інструменту для автоматичного розпізнавання даних з кредитних карток, який може бути використаний у фінансових установах та платіжних системах. Для досягнення цієї мети застосовуються сучасні методи комп'ютерного зору, що дозволяють забезпечити високу точність та швидкість обробки зображень. У ході розробки програмного забезпечення були проведені такі етапи:

1. Аналіз існуючих рішень та визначення вимог до програмного забезпечення: проведено дослідження поточних методів та технологій розпізнавання символів, що використовуються в різних галузях, зокрема у фінансовому секторі.

2. Вибір оптимальних алгоритмів та інструментів: обрані та адаптовані алгоритми комп'ютерного зору та обробки зображень, зокрема, технології OCR (Optical Character Recognition).

3. Розробка архітектури програми: створено архітектуру, яка включає модулі для попередньої обробки зображень, сегментації та розпізнавання символів. Це забезпечило гнучкість та масштабованість програмного забезпечення.

4. Реалізація програмного забезпечення: здійснено розробку з використанням бібліотек OpenCV, imutils для обробки зображень, NumPy для аналізу даних, PyQt5 для створення графічного інтерфейсу користувача та FPDF для генерації PDF-документів з результатами розпізнавання.

5. Тестування та оцінка ефективності: проведено тестування програмного забезпечення на реальних даних, що дозволило оцінити його точність, надійність та швидкість роботи.

6. Результатом роботи є програмне забезпечення, здатне розпізнавати символи на кредитних картках різних типів та форматів. Це рішення може бути використане в різних сферах, зокрема у фінансових установах, платіжних системах, а також інших галузях, де необхідна швидка обробка інформації з платіжних карток.

Ключові слова: розпізнавання символів, кредитна картка, Python, OpenCV, обробка зображень, OCR.

Постановка проблеми. У сучасному світі, де цифрові технології розвиваються швидкими темпами, автоматизація процесів обробки фінансової інформації стає все більш актуальною. Одним із ключових паараметрів цієї авто-

матизації є швидке та точне зчитування даних з кредитних карток [1–3]. Однак, незважаючи на значний прогрес у галузі комп'ютерного зору, існують проблеми, які потребують вирішення, а саме:

Різноманітність форматів карток. Кредитні картки випускаються різними банками та платіжними системами, що призводить до варіацій у дизайні, розташуванні та форматі інформації на картках.

Якість вхідного зображення. Фотографії кредитних карток можуть мати різну якість, освітлення, кути зйомки, що ускладнює процес розпізнавання.

Безпека та конфіденційність. Обробка фінансової інформації вимагає високого рівня захисту даних та має відповідати стандартам безпеки.

Швидкість обробки. Для забезпечення продуктивності фінансових операцій необхідно досягти високої швидкості розпізнавання при збереженні точності.

Інтеграція з існуючими системами. Розроблене програмне забезпечення повинно легко інтегруватися з існуючими фінансовими системами.

Адаптивність до нових форматів. З появою нових типів карток та зміною дизайну існуючих, система повинна бути здатною адаптуватися без значних модифікацій.

Обмеження обчислювальних ресурсів. Необхідність забезпечити ефективну роботу системи на пристроях з різною архітектурою та операційними системами.

Розроблене програмне забезпечення повинно бути достатньо гнучким для адаптації до нових викликів у сфері обробки фінансової інформації та здатним задовольнити потреби як великих фінансових установ, так і малого бізнесу у швидкій та надійній обробці даних кредитних карток.

Постановка завдання. Метою роботи є розробка програмного забезпечення для автоматичного розпізнавання символів на кредитних картках з використанням мови програмування Python та методів комп'ютерного зору.

Виклад основного матеріалу. Шрифт OCR-A, створений спеціально для алгоритмів оптичного розпізнавання символів. В роботі використовувався нижченаведений алгоритм для комп'ютерного зору та обробки зображень:

1. Локалізувати чотири групи з чотирьох цифр на кредитній картці.
2. Виділити кожну з цих чотирьох груп з подальшою сегментацією кожної з шістнадцяти цифр окремо.
3. Розпізнати кожну з шістнадцяти цифр та кожну літеру імені власника кредитної картки за допомогою зіставлення з шаблоном шрифту.

Шрифт OCR-A був розроблений наприкінці 1960-х років таким чином, щоб тогочасні алго-

ритми розпізнавання і люди могли легко розпізнавати символи. Шрифт підтримується організаціями зі стандартизації, зокрема ANSI та ISO. Незважаючи на те, що сучасні системи розпізнавання не потребують спеціалізованих шрифтів, таких як OCR-A, він все ще широко використовується на посвідченнях особи, виписках і кредитних картках.

Насправді, існує досить багато шрифтів, розроблених спеціально для OCR, зокрема OCR-B і MICR E-13B. Шрифт MICR E-13B використовується на паперових чеках та розшифровується, як розпізнавання символів магнітним чорнилом. Магнітні датчики, камери та сканери регулярно зчитують ваші чеки. Кожен з наведених вище шрифтів має одну спільну рису – вони призначені для легкого розпізнавання [4–6].

Розроблене програмне забезпечення зіставлення шаблонів для шрифту OCR-A, який часто зустрічається на кредитних і дебетових картках. Застосовано низку операцій обробки зображень, зокрема порогове значення, обчислення градієнтного представлення величин, морфологічні операції та виділення контурів.

```
FIRST_NUMBER = {
    "3": "American Express",
    "4": "Visa",
    "5": "MasterCard",
    "6": "Discover Card"
}
```

Рис. 1. Типи кредитних карток

```
def preprocessing_find_contours(path):
    rectkernel = cv2.getStructuringElement(cv2.MORPH_RECT, (9, 3))
    sqkernel = cv2.getStructuringElement(cv2.MORPH_RECT, (5, 5))
    img = cv2.imread(path)
    gray = cv2.cvtColor(img, cv2.COLOR_BGR2GRAY)
    gray = imutils.resize(gray, width=300)
    tophat = cv2.morphologyEx(gray, cv2.MORPH_TOPHAT, rectkernel)
    gradX = cv2.Sobel(tophat, ddepth=cv2.CV_32F, dx=1, dy=0, ksize=-1)
    gradX = np.absolute(gradX)
    (minVal, maxVal) = (np.min(gradX), np.max(gradX))
    gradX = 255 * (gradX - minVal) / (maxVal - minVal)
    gradX = gradX.astype('uint8')
    gradX = cv2.morphologyEx(gradX, cv2.MORPH_CLOSE, rectkernel)
    thresh = cv2.threshold(gradX, 0, 255, cv2.THRESH_BINARY | cv2.THRESH_OTSU)[1]
    thresh = cv2.morphologyEx(thresh, cv2.MORPH_CLOSE, sqkernel)
    cnts = cv2.findContours(thresh.copy(), cv2.RETR_EXTERNAL, cv2.CHAIN_APPROX_SIMPLE)
    cnts = imutils.grab_contours(cnts)
    cnts = contours.sort_contours(cnts, method='left-to-right')[0]
    return cnts
```

Рис. 2. Функція для знаходження контурів

Типи кредитних карток, такі як American Express, Visa, MasterCard, Discover Card, можна визначити за першою цифрою в 16-значному номері кредитної картки (рис. 1). Ми завантажуюмо еталонне OCR-A зображення, конвертуємо його у відтінки сірого, порогові значення, інвертуємо та знаходимо контури. Під час кожної з цих

операцій ми зберігаємо або перезаписуємо наше еталонне зображення, обходимо контури, виділяємо та асоціюємо області інтересу з відповідними значеннями (рис. 2).

```
def find_ROI(path):
    img = cv2.imread(path)
    gray = cv2.cvtColor(img, cv2.COLOR_BGR2GRAY)
    thresh = cv2.threshold(gray, 10, 255, cv2.THRESH_BINARY_INV)[1]
    cnts = cv2.findContours(thresh.copy(), cv2.RETR_EXTERNAL, cv2.CHAIN_APPROX_SIMPLE)
    cnts = imutils.grab_contours(cnts)
    cnts = contours.sort_contours(cnts, method='left-to-right')[0]
    sample = {}
    for (i, c) in enumerate(cnts):
        (x, y, w, h) = cv2.boundingRect(c)
        roi = thresh[y:y+h, x:x+w]
        roi = cv2.resize(roi, (57, 88))
        sample[i] = roi
    return sample
```

Рис. 3. Функція для розпізнавання значень

Ми повинні переконатися, що кожна цифра масштабується до фіксованого розміру, щоб застосувати зіставлення з шаблоном для розпізнавання цифр та асоціюємо кожен цифру та літеру із зображенням зони інтересу (рис. 3). На цьому етапі ми закінчили розпізнавати цифри і літери з нашого еталонного зображення і пов'язували їх з відповідними значеннями та ініціалізували пари структурних елементів. Ви можете уявити собі це як невелику матрицю, яку ми переміщуємо по зображенню для виконання операцій, таких як згладжування, підвищення чіткості, виявлення меж та інших операцій з обробки зображення.

```
def for_digits(cnts,path):
    img = cv2.imread(path)
    gray = cv2.cvtColor(img, cv2.COLOR_BGR2GRAY)
    gray = imutils.resize(gray, width=300)
    locs_d = []
    for (i, c) in enumerate(cnts):
        (x, y, w, h) = cv2.boundingRect(c)
        ar = w / float(h)
        if ar > 2.5 and ar < 4.0:
            if (w > 40 and w < 55) and (h > 10 and h < 20):
                locs_d.append((x, y, w, h))
    locs_d = sorted(locs_d, key=lambda x: x[0])
    output = []
    for (i, (gX, gY, gW, gH)) in enumerate(locs_d):
        group_output = []
        group = gray[gY - 5:gY + gH + 5, gX - 5:gX + gW + 5]
        group = cv2.threshold(group, 0, 255, cv2.THRESH_BINARY | cv2.THRESH_OTSU)[1]
        grpconts = cv2.findContours(group, cv2.RETR_EXTERNAL, cv2.CHAIN_APPROX_SIMPLE)
        grpconts = imutils.grab_contours(grpconts)
        grpconts = contours.sort_contours(grpconts, method='left-to-right')[0]
        for c in grpconts:
            (x, y, w, h) = cv2.boundingRect(c)
            roi = group[y:y+h, x:x+w]
            roi = cv2.resize(roi, (57, 88))
            scores = []
            for (digit, digitROI) in digits.items():
                result = cv2.matchTemplate(roi, digitROI, cv2.TM_CCORF)
                (score, _, _) = cv2.minMaxLoc(result)
                scores.append(score)
            group_output.append(str(np.argmax(scores)))
        output.extend(group_output)
    return output
```

Рис. 4. Функція для розпізнавання цифр

Ми створили два таких елемента – прямокутний і квадратний. Прямокутний ми використовуємо для морфологічного виокремлення дрібних елементів та деталей із заданих зображень, виявлення світлих ділянок на темному фоні (наприклад, номерів кредитних карток), а квадрат-

ний – для операції закриття. Наступним кроком у нашій спробі виокремити цифри є обчислення градієнта Шарра для зображення в напрямку по осі абсцис та для усунення прогалин, ми робимо операцію закриття. Далі ми виконуємо метод Оцу та бінарний поріг зображення за яким іде ще одна операція закриття, давайте пройдемося по контурах, фільтруючи на основі співвідношення сторін кожного з них, що дозволить нам відділити місця розташування груп цифр та літер від інших, несуттєвих ділянок кредитної карти. Значення співвідношення сторін та мінімальної ширини і висоти були знайдені експериментально на наборі вхідних зображень кредитних карток.

```
def for_alphabets(cnts,path):
    img = cv2.imread(path)
    gray = cv2.cvtColor(img, cv2.COLOR_BGR2GRAY)
    gray = imutils.resize(gray, width=300)
    locs_a = []
    for (i, c) in enumerate(cnts):
        (x, y, w, h) = cv2.boundingRect(c)
        if y > 145 and y < (gray.shape[0] - 8) and x < (gray.shape[1] * 5 / 8) and x > 10:
            locs_a.append((x, y, w, h))
    locs_a = sorted(locs_a, key=lambda x: x[0])
    output = ''
    for (i, (gX, gY, gW, gH)) in enumerate(locs_a):
        group = gray[gY - 5:gY + gH + 5, gX - 5:gX + gW + 5]
        group = cv2.threshold(group, 0, 255, cv2.THRESH_BINARY | cv2.THRESH_OTSU)[1]
        grpconts = cv2.findContours(group, cv2.RETR_EXTERNAL, cv2.CHAIN_APPROX_SIMPLE)
        grpconts = imutils.grab_contours(grpconts)
        grpconts = contours.sort_contours(grpconts, method='left-to-right')[0]
        card_name = ''
        for c in grpconts:
            (x, y, w, h) = cv2.boundingRect(c)
            roi = group[y:y+h, x:x+w]
            roi = cv2.resize(roi, (57, 88))
            scores = []
            for i in range(len(char)):
                result = cv2.matchTemplate(roi, char[i][1], cv2.TM_CCORF)
                (score, _, _) = cv2.minMaxLoc(result)
                scores.append(score)
            index_max_score = np.argmax(scores)
            card_name = card_name + char[index_max_score][0]
        output = output + " " + card_name
    return output
```

Рис. 5. Функція для розпізнавання літер

Використовуючи OpenCV, ми отримуємо параметри, необхідні для виділення області інтересу, що містить кожен цифру (рис. 4) та літеру (рис. 5). Для того, щоб зіставлення з шаблоном працювало з певним ступенем точності, ми змінюємо розмір області інтересу до того ж розміру, що і наші еталонні зображення шрифту OCR-A (57×88 пікселів).

OpenCV має зручну функцію, за допомогою якої ви порівнюєте два зображення: одне з яких є шаблоном, а інше – вхідним зображенням. Мета її застосування – визначити, наскільки зображення схожі. Порівнюємо еталонне зображення і область інтересу з кредитної картки та зберігаємо результат та додаємо його до списку результатів. Ми знаходимо цифру або літеру з максимальною схожістю, яка відповідає певному індексу. Цілочисельне представлення цього індексу представляє найбільш ймовірну цифру або літеру на основі порівняння з кожним шаблоном (індекси вже попередньо відсортовані).

Розроблене програмне забезпечення: зберігає типи кредитних карток у словнику; розпізнає цифри та літери з еталонного зображення; зберігає шаблони цифр і літер у словнику; локалізує чотири групи номерів (містить чотири цифри (загалом 16 цифр)), кредитних карток; виконує зіставлення шаблонів для кожної цифри та літери, порівнюючи кожну окрему область інтересів з шаблоном, зберігаючи результат для кожної спроби зіставлення; знаходить найбільш схожі цифри та літери і будує список, який містить номер, ім'я власника та термін дії кредитної картки; виводить отримані результати в розроблений графічний інтерфейс та зберігає в PDF файл.

Висновки. Розроблено програмне забезпечення, яке відповідає сучасним потребам фінансового сектору в автоматизації та підвищенні безпеки обробки даних кредитних карток. Застосування комп'ютерного зору та сучасних бібліотек дозволило створити ефективне рішення для розпізнавання символів. Охоплено всі основні етапи розробки програмного забезпечення, від аналізу вимог до тестування, що забезпечує повноту та якість кінцевого продукту. Розроблено архітектуру програми, яка включає модулі попередньої обробки, сегментації та розпізнавання, що забезпечує гнучкість та можливість подальшого вдосконалення та може стати основою для створення більш складних систем автоматизації в фінансовій сфері.

Список літератури:

1. Bychkov, O., Zubyk, L., Gololobov, D., Isaienkov, Y., Grynkevych, G. and Ivanytska, A., 2023. The System for Recognizing Useful Information of the Client's ID-Card Based on Machine Learning Technologies.
2. Sun, G. and You, F., 2020, November. Bank card number recognition system based on deep learning. In Proceedings of the 2020 4th International Conference on Electronic Information Technology and Computer Engineering (pp. 745-749).
3. Xin, Y., Shi, P. and Han, S., 2019, September. An Automatic Location and Recognition Method for Bank Card Number. In Proceedings of the 2019 International Conference on Robotics, Intelligent Control and Artificial Intelligence (pp. 728-732).
4. Ou, Z., Xiong, B., Xiao, F. and Song, M., 2020. ERCS: An efficient and robust card recognition system for camera-based image. China Communications, 17(12), pp. 247-264.
5. Maithani, M., Meher, D. and Gupta, S., 2023. Multilingual Text Recognition System. In Advances in Signal Processing, Embedded Systems and IoT: Proceedings of Seventh ICMEET-2022 (pp. 103-114). Singapore: Springer Nature Singapore.
6. Poudel, U., Regmi, A.M., Stamenkovic, Z. and Raja, S.P., 2023. Applicability of OCR Engines for Text Recognition in Vehicle Number Plates, Receipts and Handwriting. J. Circuits Syst. Comput., 32(18), pp. 2350321-1.
7. Padole, C. and Mitra, D., 2022. Information Extraction from Visiting Cards Using OCR and Post-Processing in Python. International Journal of Scientific and Technical Research in Engineering (IJSTRE), 7(05), pp. 1-7.
8. Yusman, N.S. and Ibrahim, M.M., 2021. Extracting Information from Identity Card into Electronic Form Using Image Processing Technique. INOTEK 2021, 1, pp. 135-136.
9. Gupta, M.K., Shah, R., Rathod, J. and Kumar, A., 2021, November. Smartidocr: Automatic detection and recognition of identity card number using deep networks. In 2021 Sixth International Conference on Image Information Processing (ICIIP) (Vol. 6, pp. 267-272). IEEE.
10. Manage, P., Ambe, V., Gokhale, P., Patil, V., Kulkarni, R.M. and Kalburgimath, P.R., 2020, December. An intelligent text reader based on python. In 2020 3rd International Conference on Intelligent Sustainable Systems (ICISS) (pp. 1-5). IEEE.

Novak D.S., Oleshchenko L.M., Vasylenko V.M., Guida O.H., Ometsynska N.V. DEVELOPMENT OF SOFTWARE FOR CREDIT CARD CHARACTER RECOGNITION IN PYTHON

The work is devoted to the development of software for automated character recognition on credit cards using the Python programming language. The relevance of the topic is due to the rapid growth of electronic payments, which requires improving financial information processing technologies and increasing the level of security during transactions. In today's environment, when the speed and accuracy of data processing play a crucial role, automating the process of reading information from credit cards is extremely important.

The main goal of this work is to create an efficient and reliable tool for automatic recognition of credit card data that can be used in financial institutions and payment systems. To achieve this goal, modern computer vision methods are used to ensure high accuracy and speed of image processing. The following stages were carried out during the software development:

1. *Analysis of existing solutions and determination of software requirements: a study of current methods and technologies for character recognition used in various industries, including the financial sector, was conducted.*

2. *Selection of optimal algorithms and tools: computer vision and image processing algorithms, in particular, OCR (Optical Character Recognition) technology, were selected and adapted.*

3. *Development of the program architecture: an architecture was created that includes modules for image preprocessing, segmentation, and character recognition. This ensured the flexibility and scalability of the software.*

4. *Software implementation: development was carried out using OpenCV libraries, imutils for image processing, NumPy for data analysis, PyQt5 for creating a graphical user interface, and FPDF for generating PDF documents with recognition results.*

5. *Testing and performance evaluation: the software was tested on real data, which allowed us to evaluate its accuracy, reliability and speed.*

6. *The result of the work is software capable of recognizing symbols on credit cards of various types and formats. This solution can be used in various fields, including financial institutions, payment systems, and other industries that require fast processing of information from payment cards.*

Key words: *character recognition, credit card, Python, OpenCV, image processing, OCR.*

Palonyi A.S.

Flight Academy of the National Aviation University

Nechypurenko A.G.

Flight Academy of the National Aviation University

MODELLING THE DYNAMICS OF OCCUPATIONAL STRESS IN AIR TRAFFIC CONTROL

The subject matter of the article is occupational stress among air traffic controllers, the key factors causing it, and real-time management approaches. The research focuses on a comprehensive analysis of stressors and their impact on the overall stress level of air traffic controllers while performing their professional duties. The goal of the article is to develop a system dynamics model of work-related stress among air traffic controllers, taking into account various causes of stress and their interactions, as a basis for determining the overall stress level at air traffic controller workplaces and creating effective stress management strategies in the dynamic air traffic management environment. The tasks of the article: to investigate the primary sources of stress inherent in air traffic control work and analyze contemporary approaches to modeling the dynamic nature of professional stress; to identify and classify factors that contribute to the increase in the overall stress level at air traffic controller workplaces; to construct a graphical model of the relationships among stressor groups and to identify those that act as primary mediators in the transmission of information between other types of stressors; to develop a system dynamics model of occupational stress that illustrates both direct and feedback effects between the perceived overall stress level at air traffic controller workplaces and the relevant factors influencing it. The methods used are: logical analysis, cluster analysis, graph theory and graph analysis, and system dynamics modeling. The study defines and classifies a set of stressors (by their source) that increase the sense of overall stress among air traffic controllers, each with its corresponding controllability index and duration of impact. A system dynamics model of professional stress has been developed, consisting of a central component "air traffic controller's professional stress level" and several aggregator components that accumulate the impact of factors of different natures. Feedback loops in the model demonstrate potential reinforcing effects within the system. The scientific novelty of the results lies in the fact that the conceptual system dynamics model of professional stress among air traffic controllers provides a visual representation of the dynamic nature of stress experienced by air traffic controllers and the impact of key factors on their perceived stress at work. The presented model can serve as a basis for monitoring the dynamics of professional stress levels among air traffic controllers and enable effective stress management by supervisors of air traffic control shifts through the development and revision of operational, tactical, and strategic measures to address stress.

Key words: *air traffic controller specialists, occupational stress, stress management, stressors, system dynamic.*

Formulation of the problem. Air traffic control specialists (ATCs) work in a high-stress environment that requires constant vigilance, quick decision-making, and management of complex information. The demanding nature of ATC work can lead to occupational stress, fatigue, and potential impacts on job performance and safety [1]. Studies have found that even a 1% increase in air traffic can lead to a 10% increase in critical incidents for ATCs [2]. One study indicated that about 52% of air traffic management incidents were related to human error by controllers [3]. For instance, a survey among ATCs in China found that 77.4% reported experiencing stress in their work environment [4]. Given the critical role ATCs play in aviation safety, it is imperative to develop

effective systems for managing occupational stress in this profession. Shift supervisors are in a key position to monitor and support ATCs, but may lack tools to systematically assess stress levels and determine appropriate interventions [5]. A decision support system (DSS) tailored for ATC shift supervisors could help optimize stress management and maintain high levels of performance and safety. The development of the DSS is based on functional model of ATC stress management and main requirements, identified in our previous study [6].

The relevance of this research stems from the need to proactively address occupational stress in ATCs as air traffic grows, leveraging technology to support evidence-based decision making by supervisors. An

effective DSS has the potential to enhance wellbeing of ATCs, reduce fatigue-related errors, and ultimately contribute to aviation safety.

Analysis of recent research and publications.

Recent years have seen a growing body of research exploring the intricate relationships between mental workload, stress, and job performance in the ATC domain. Multiple studies have investigated how varying levels of mental workload impact ATCs' task performance. Metzger and Parasuraman (2005) found that high mental workload negatively affected ATCs' ability to detect conflicts and make timely decisions [7]. Similarly, Pant et al. (2012) reported that excessive mental workload could lead to diminished focus and increased likelihood of errors in ATC tasks [8]. ATC workload encompasses two dimensions: intrinsic complexity related to air traffic structure, and human factors associated with the controller's capabilities and vigilance [9]. While automation can reduce certain types of workloads, it may also introduce new challenges and sources of stress [10]. Endsley and Kiris (1995) cautioned that excessive automation could lead to reduced situational awareness and difficulties in problem-solving during system failures [11]. While ATCs will retain responsibility for air traffic safety in NextGen ATC systems, their direct control capabilities may be reduced. It could potentially lead to increased stress or workload [12].

The primary source of stress for ATC controllers stems from their critical role in ensuring flight safety, where errors are not permissible. Concentration provokes stress, which leads to tension that cannot be overcome [13]. Zeier and Grubenmann (1990) identified key occupational stressors inherent to ATC work, including: dissatisfaction with management and organizational policies, workload control challenges, chronic fatigue and irregular work schedules [14]. In general, the main sources of stress reported by ATCs are related to both operational aspects (e.g. traffic load peaks, time pressure, equipment limitations) and organizational factors (e.g. shift schedules, role conflicts, lack of control over work). Paradoxically, many errors also occur during periods of light traffic due to understimulation [15]. These occupational stressors can have significant negative impacts on ATCs' health, wellbeing and job performance. Short-term effects include changes in physiological measures like hormone levels and heart rate, while long-term consequences may involve serious illnesses such as hypertension, heart disease and psychoneurotic disorders [16].

There are two main approaches to explaining stress in the workplace: unitary (causal) and

multidimensional (integrative). The unitary approach explicates discrete aspects of workplace stress processes, often adopting a theoretical perspective that focuses on stress etiology, prevention methodologies, minimization strategies, or stress management techniques. This category encompasses causal models such as the "person-environment fit" and "job demands-control" frameworks. Intervention models are predicated on developing approaches integral to stress management, which can be conceptualized through primary, secondary, and tertiary prevention systems. Primary prevention entails the elimination of existing workplace stressors. Secondary prevention emphasizes enhancing individual awareness and providing coping mechanisms. Tertiary prevention targets the treatment and support of individuals presumed to suffer from severe stress-related disorders. The multidimensional approach typically amalgamates causation with intervention. Christian et al. (2009) proposed a holistic model incorporating both explanatory and action phases [17]. An exemplar of this integrative approach for healthcare professionals is Dunn's conceptual model of medical student wellbeing [18]. This model's "coping reservoir" illustrates the interaction between positive factors (psychosocial support, social engagement, mentorship, intellectual stimulation) and negative factors (stress, internal conflict, time and energy demands), while accounting for personality factors and potential outcomes (burnout or resilience). The authors proposed this model for individual-level application to identify potential intervention areas.

A pilot study conducted among Spanish ATCs found that mindfulness-based interventions led to improved memory, concentration, and reduced irritability and tension [19]. Li et al. (2020) reported that mindfulness techniques helped decrease anxiety levels among pilots, suggesting potential applicability to ATCs as well [20]. This research Bader Alaydi and Siew-Imm Ng (2024) confirmed that mindfulness played a moderating role: more mindful ATCs exhibited less performance degradation due to workload. Workplace social support also had a mitigating effect: controllers who perceived greater job support experienced reduced adverse effects of workload on their performance [21].

Workplace stress among ATCs represents a complex and dynamic phenomenon frequently reported by the majority of controllers. While current models in the field of human factors and ergonomics have identified individual, psychosocial, and organizational factors associated with occupational stress, they may not fully explore the dynamic

feedback between these factors, which could be a source of complexity. From a dynamic systems modeling perspective, conceptualizing workplace stress perception among ATCs should be grounded in a sociotechnical systems approach.

Understanding occupational stress necessitates a systemic view based on a sociotechnical approach [22]. The application of system dynamics and simulation modeling techniques to complex systems, particularly human factors such as stress, proves computationally beneficial. There is a paucity of research examining workplace stress through the lens of a feedback model. The need for a systemic approach was acknowledged by Karasek, the originator of the Job Demands-Control model [23]. Dynamic feedback can reflect both the immediate consequences of specific workplace stressors and their corresponding causes. Researchers A. Morris, V. Ross, and M. Ulieru have proposed a stress model incorporating 17 feedback loops that either amplify or attenuate overall stress levels, while also elucidating the factors influencing stress [24]. P. A. Hancock's dynamic model of stress and attention is predicated on the concept of adaptability [25]. The model posits a general adaptive strategy at both physiological and psychological levels in response to stress. When adaptive capacities are exceeded, a transition from stable to unstable operational modes occurs. The model facilitates the visualization of interactions between various stress sources and their impact on adaptability through vector representations. Consequently, it elucidates the mechanisms underlying performance breakdown under stress due to the depletion of compensatory physiological resources. Another study presents a model simulating the dynamics of stress generation, accumulation, and reduction in oncology center nursing staff [26]. The model effectively represents the complex feedback mechanisms involved in nursing stress and absenteeism, provides managers a tool to dynamically monitor stress levels and test different policy interventions.

Task statement. The research purposes of the articles are to discover key causes of occupational stress among ATCs, to analyze modern real-time stress management approaches and to develop a system dynamics model of work-related stress among ATCs, taking into account various stressors and their interactions, as a basis for determining the overall stress level at ATC workplaces.

Outline of the main material of the study. Based on the conducted analysis of primary stress sources and specific stressors inherent to ATC' professional activities, a complex of factors leading to stress in

ATCs' workplaces has been identified. It has been determined that ATCs' thorough understanding of stress impact specifics on their cognitive and psychophysiological state, as well as teamwork, is critical for managing stress during the performance of their professional duties at workplaces and, on a broader scale, their careers. Incidents become a potent source of stress, often requiring psychological support; therefore, it is crucial to skillfully manage stress both at individual and team levels. The lack of transparency and feedback tools, coupled with a punitive culture in control centers, exacerbates the psychological impact of serious incidents on ATCs. Background stress in the ATC job refers to the constant psychological stress and strain, that often occurs in this profession and can affect the psycho-emotional state of an aviation specialist.

The application of cluster analysis in constructing a system dynamics model of ATC stress can help identify groups of similar stress factors that may interact and influence ATC' stress levels. Typically, this method is applied using statistical analysis, but we employed a simplified version of cluster analysis based on a logical understanding of interrelationships between stressors. Six clusters of occupational stress among ATCs have been identified by source (Table 1). Each stressor from the presented categories has varying degrees of controllability and duration of impact (SC and TI indices, respectively).

The following abbreviations are used in the table 1: **SC** – stressor controllability ('0' – unmanageable stressor, '1' – partly manageable, '2' – manageable stressor); **TI** – time impact ('0' – short-term stressor (during one or several shifts), '1' – long-term stressor, '2' – throughout professional life).

The proposed classification helps identify which causes of stress are temporary and which may affect ATCs over an extended period, crucial for developing stress management strategies and improving working conditions. The classification by duration of impact, reflecting the temporal dimension of stress development, allows for differentiation of stress management measures at operational, tactical, and strategic levels.

Some stressors are only partially controllable by the ATC or aviation organization. For example, "fatigue" can be reduced through work-rest schedule management and support, but cannot be completely eliminated due to the high intensity and responsibility of the job. Similarly, shift work changes can be optimized but not fully eliminated as the service must operate continuously. Many key stressors are inherent to the nature of this profession and cannot be managed

Table 1
Classification key occupational stressors

Type of stress	Occupational stressor	SC	TI
I. Operational	1. Extreme weather conditions, large-scale temporary airspace restrictions, significant air traffic flow changes and flights with head of state status	0	0
	2. Discrepancies between actual airspace situations and data obtained from surveillance systems	1	0
	3. Emergency and unforeseen situations within the ATC's area of responsibility	0	0
	4. Technical malfunctions and failures	0	0
	5. Shift work	0	2
	6. Inability to fully accommodate the requirements and expectations of pilots, adjacent sector controllers, and other aviation professionals when addressing competing air traffic management tasks	1	2
II. Ergonomic-Life Safety	7. Ergonomic deficiencies in the workplace	1	1
	8. Physical limitations and adverse environmental factors in the workplace	1	2
III. Information-cognitive	9. High air traffic complexity and overload of the air traffic management system, or conversely, underload	1	1
	10. High demands on concentration and attention distribution	1	2
	11. Multitasking and the need to prioritize air traffic problem resolution	1	2
	12. Information overload or, conversely, lack of information in hazardous and rapidly changing situations	1	1
	13. Lack of time for decision-making (not just a time limit)	1	2
IV. Social	14. Necessity to maintain effective communication	2	2
	15. Interpersonal conflicts with supervisors and colleagues	1	1
	16. Need for adaptation to cultural differences among ATCs	1	1
	17. Insufficient recognition of real merits and achievements by managers	1	1
V. Psychological	18. Responsibility for flight safety and fear of failure	1	2
	19. Inability to influence certain factors in the professional environment	0	2
	20. Low self-efficacy	2	1
	21. Perception of poor occupational stress self-management	2	1
	22. Unrealistic expectations of oneself and others	2	1
	23. Changes in aviation laws, procedures and need for lifelong professional training	1	2
	24. Dependence of personal performance efficiency on other aviation professionals	1	2
	25. Necessity to adhere to standard procedures	1	2
	26. Processes related to aviation incident prevention (conducting internal investigations)	1	1
	27. Feelings of isolation from the external world and indirect nature of control	1	2
	28. Fatigue, depression, and burnout	1	1
VI. Organizational	29. Ineffective personnel management decisions	1	1
	30. Suboptimal changes in duty shift schedules	1	1
	31. Dissatisfaction with management and company policies	1	1
	32. Uncertainty regarding career advancement prospects	1	1

intrinsically, but can be partially compensated through organizational measures and development of the social and individual stress resilience resources.

The interrelationships between stress clusters are presented as a multi-connected directed graph (Fig. 1). In this model, each cluster of occupational stress is represented by a graph node, and the graph edges indicate connections between stressors.

The graph demonstrates the interaction and influence of separate stress factor groups on each other, facilitating a better understanding of the sources of ATCs' occupational stress and possible management approaches. The adjacency matrix (Table 2) reflects the connections of the resulting graph and can be

applied in a knowledge-based system to create models that simulate the impact of various stress factors on the overall stress level of ATCs. However, the considered interrelationships may vary depending on the specific situation and individual characteristics of the ATC.

If the earlier mentioned graphical model is represented with graph nodes numbered from 1 to 6, and edges from 1 to 14, we obtain the graphical model shown in Fig. 2. To formalize the relationships between graph elements (edges and nodes), we construct an incidence matrix (Table 3).

The betweenness centrality calculations indicate that nodes №1 (0.075) and №5 (0.225) are key in this graph. Consequently, operational stress and

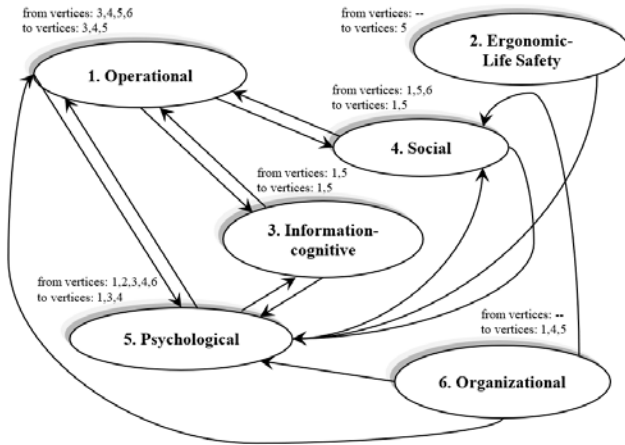


Fig. 1. The model of interrelationships of ATC occupational stressors groups

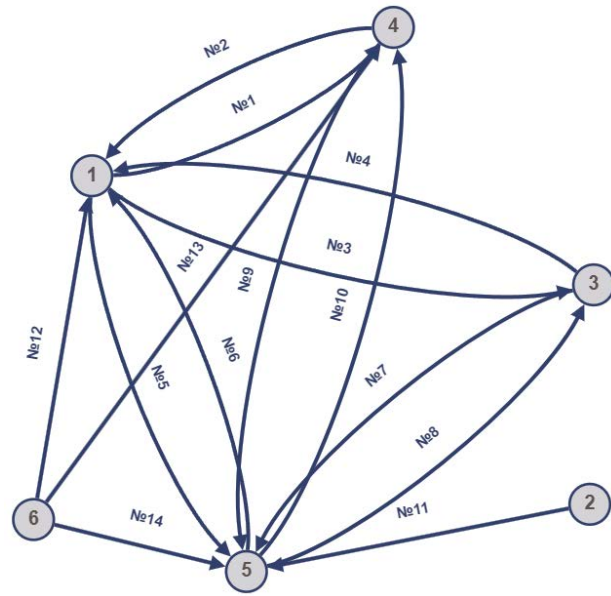


Fig. 2. Graph of interconnections of ATCs' occupational stress clusters

Table 2

The adjacency matrix of stress clusters

	3,4,5,6	-	1,5	1,5,6	1,2,3,4,6	-
	1	2	3	4	5	6
1	0	0	1	1	1	0
2	0	0	0	0	1	0
3	1	0	0	0	1	0
4	1	0	0	0	1	0
5	1	0	1	1	0	0
6	1	0	0	1	1	0

Table 3

Incident matrix of stress clusters

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
1	1	-1	1	-1	1	-1	0	0	0	0	0	-1	0	0
2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0
3	0	0	-1	1	0	0	1	-1	0	0	0	0	0	0
4	-1	1	0	0	0	0	0	0	1	-1	0	0	-1	0
5	0	0	0	0	-1	1	-1	1	-1	1	-1	0	0	-1
6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1

psychological clusters act as intermediaries in transmitting information (influence) between other clusters.

The system dynamics model of ATCs' occupational stress incorporates multidimensionality and involves several types of stressors, including perception of organizational conditions, workplace demands, control over work processes, organizational and social factors (Fig. 3).

The central component of the system dynamics model of ATCs' occupational stress is the “perceived overall job stress” – a base variable, that either increases or decreases over time depending on changes in the model's aggregator values. The level of perceived overall occupational stress is determined by five component-aggregators of the model, which accumulate the impact of job stressors

of various sources, the cumulative effect of which can be quantitatively measured – “level of perceived personal control over the work situations”, “level of perceived the teamwork quality”, “level of perceived job demands”, “level of perceived background stress”, and “level of perceived stress manageability”. Numbers from 1 to 32 on the edges of the model graph denote occupational causes of stress (their numbering corresponds to the defined list of stressors presented in Table 1) affecting the components of the model.

The '+/-' signs in the model indicate the type of relationship between different stress clusters and the model's component aggregators: '+' denotes a direct relationship, '-' – an inverse relationship. Stressors of the operational, information-cognitive, and psychological clusters decrease the level of work controllability perceived by the ATCs. Conversely, stressors from the operational, information-cognitive, psychological, and social clusters heighten the level of perceived job demands.

The identified relationships of the impact of certain types of stressors on the corresponding component-aggregators of ATCs' job stress are presented in Table 4. The structural matrix indicates the presence of a relationship between stressors and the model's component-aggregators.

Similarly, the model represents the impact of various levels of job stress aggregators on the level of overall occupational stress experienced by the ATCs. An increase in the perception of job demand level and background stress level leads to an increase in the perceived overall occupational stress indicator

(shown by '+'). Conversely, an increase in the perception of work situation controllability, teamwork effectiveness, and stress manageability positively affects the overall occupational stress indicator among ATCs, reducing the level of perceived overall job stress. (shown by '-').

Feedback loops (R1, R2, R3, R4, R5), indicated by “bold” edges on the graph, demonstrate the feedback between the five “component aggregators” and the level of overall occupational stress perceived by the ATC:

1. **R1** (connection between “work situation controllability level” and “overall occupational stress level”) demonstrates the following situation: an increase in the ATC's perception of work controllability leads to a decrease in their overall occupational stress level ('-'), but if the overall stress

level increases, it will reduce the perception of work situation controllability ('-').

2. **R2** (connection between job demand level and overall occupational stress level) shows that an increase in the perception of job demands will increase the ATC's overall occupational stress level ('+'), and in turn, an increase in the perceived overall occupational stress level will lead to a feeling of increased job demands ('+').

3. **R3** (connection between teamwork level and overall occupational stress level) demonstrates the following effect: improved teamwork effectiveness reduces the overall stress level, while an increase in the overall stress level negatively impacts teamwork effectiveness.

4. **R4** (connection between background stress level and overall occupational stress level) shows that

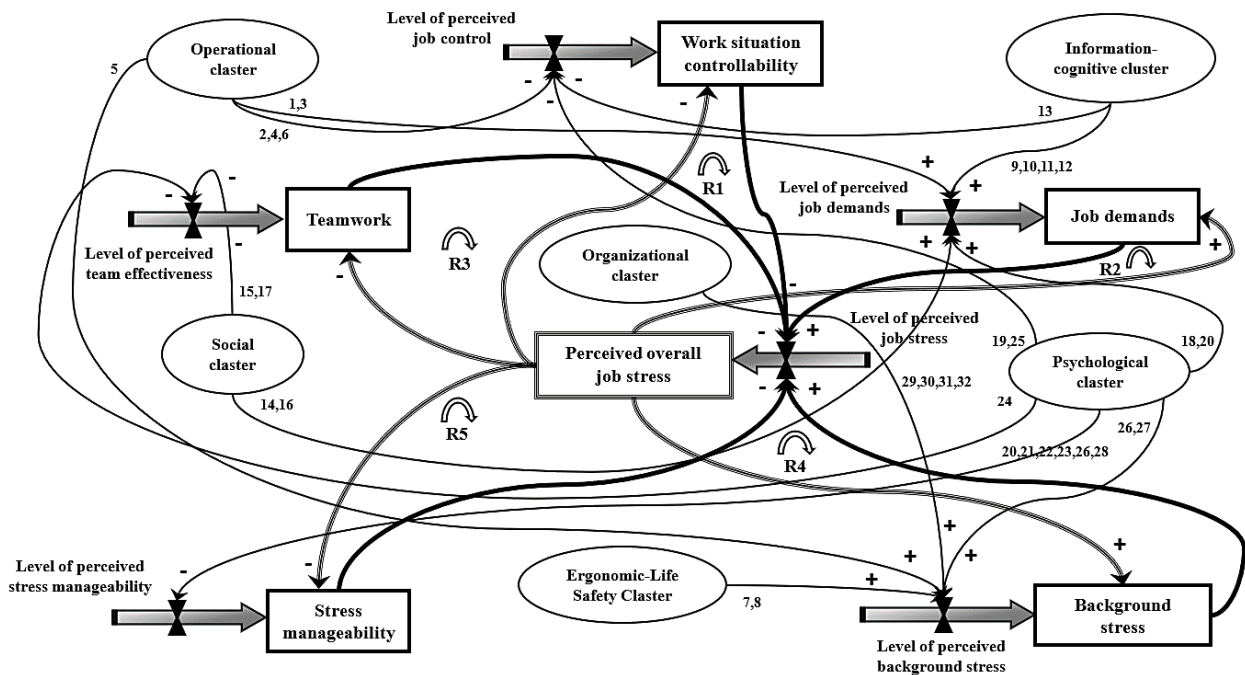


Fig. 3. System dynamics model of ATCs' job stress components

Table 4

Structural matrix of the impact of occupational stressor clusters on its key components

Stress clusters	Stress components				
	1. Level of perceived job control	2. Level of perceived job demands	3. Level of perceived team effectiveness	4. Level of perceived background stress	5. Level of perceived stress management
1. Operational	+	+	-	+	-
2. Information-cognitive	+	+	-	-	-
3. Social	-	+	+	+	-
4. Psychological	+	+	+	+	+
5. Organizational	-	-	-	+	-
6. Ergonomic-Life Safety Cluster	-	-	-	+	-

an increase in background stress level increases the overall stress level. On the other hand, an increase in the overall stress level leads to an increase in the background stress level.

5. **R5** (connection between stress management level and overall occupational stress level) reflects the following effect: an increase in the perception of stress manageability reduces the overall stress level, while an increase in the overall stress level reduces the perception of ability to manage stress by ATC.

Thus, the feedback loops demonstrate the mutual influence of different model components on the overall occupational stress level of ATCs. By altering the values of various variables (occurrence of stressors of different sources) and assessing their impact on the perceived rate of corresponding work stress type, it is possible to model the dynamics of the overall occupational stress level of ATCs over time. This allows for testing different scenarios and intervention options to reduce stress in the workplace.

Ignoring stress sources can lead to greater stress and catastrophic consequences. Stress from one of these sources may be difficult to overcome, but stress from multiple sources can be destructive. An effective stress reduction strategy should aim to eliminate both its causes and consequences, acting on all factors related to work organization, as well as personal resources and conditions in which ATCs operate.

Conclusions. The categorization of ATCs' occupational stressors proposed in this work, based on their nature of occurrence, rate of controllability, and duration of impact, organically complements and specifies the system dynamics model of job stress management. The system dynamics model of occupational stress among ATCs allows for considering various stress sources, their interaction, and serves as a basis for monitoring stress level dynamics. Quantitative assessment of individual

stressors' impact on the overall stress level of ATCs will allow determining the actually achieved stress level and predicting its changes under the influence of known factors, particularly in real-time.

The ATC shift supervisor's awareness of current and anticipated stressors, their present and potential effects on ATCs' stress levels, combined with data on existing occupational stress and alerts about approaching critical thresholds, can facilitate effective stress management in ATC workplaces. Such data and alerts will allow for swift adjustments to ATCs' occupational stress management strategies by on-duty supervisors. These strategies may encompass actions to enhance operational processes, improve the work environment, boost team collaboration, refine organizational policies, support professional growth, provide psychological assistance, and promote individual well-being among ATCs.

The directions for future research in five important areas will be outlined: (1) development methodology for quantitatively measuring the impact of specific stressors on ATCs' overall stress levels, (2) creation method for dynamically adjusting stress level thresholds based on various factors such as traffic complexity, weather conditions, and individual ATC experience levels, (3) development method for creating and updating individual stress management profiles for each ATC, allowing for more tailored interventions and support, (4) utilization of machine learning techniques and data analytics to build intelligent real-time monitoring and predictive models that can forecast changes in ATC stress levels based on known stressors and historical data (for individual ATCs and the team), (5) development framework of an AI-powered system that can suggest appropriate interventions to the supervisor based on current stress levels, predicted trends, and past effectiveness of various strategies (particularly in simulation mode).

Bibliography:

1. Saleh L. M., Russeng S. S., Tadjuddin I., Yanti I. H., Syafitri N. M., Yusbud M., Rahmadani Y. The Development of a Work Stress Model for Air Traffic Controllers in Indonesia. *Kesmas: Jurnal Kesehatan Masyarakat Nasional* (National Public Health Journal). 2022. Vol. 17 (1). P. 40-47.
2. Critical Incident Stress Management in Air Traffic Control (2004-028EEC Note 2004/15). EUROCONTROL EXPERIMENTAL CENTRE, 1 January 2014. 153 p.
3. Zhang H. H. Human factors in air traffic control safety. *Manager J.* 2010. Vol. 18. P. 130-130.
4. Zhang X, Liu M, Bai P, Zhao Y. Effects of Fatigue and Tension on the Physical Characteristics and Abilities of Young Air Traffic Controllers. *Applied Sciences.* 2023. Vol. 13 (18). URL: <https://doi.org/10.3390/app131810383> (date of access: 20.07.2024).
5. Пальоний А. С., Нечипуренко А. Г. Актуальність розробки системи підтримки прийняття рішень для ефективного керування професійним стресом авіадиспетчерів. *Проблеми та перспективи розвитку науки, освіти, технологій і суспільства: збірник тез доповідей міжнародної науково-практичної конференції* (Кропивницький, 29 листопада 2023 р.): частина 3. Кропивницький: ЦФЕНД, 2023. С. 42-44.

6. Palonyi A.S. Development of requirements for a decision support system for a shift supervisor to manage professional stress of air traffic controllers. Вчені записки таврійського національного університету імені В.І. Вернадського. Серія: Технічні науки. 2024. Том 35 (74), №2. С. 172-179.
7. Metzger U., Parasuraman R. Automation in Future Air Traffic Management: Effects of Decision Aid Reliability on Controller Performance and Mental Workload. *Human Factors Journal of Human Factors and Ergonomics Society*. 2005. Vol. 47. P. 35-49.
8. Pant R., Taukari A., Sharma K. Cognitive Workload of Air Traffic Controllers in Area Control Center of Mumbai Enroute Airspace. *J. Psychosoc. Res.* 2012. Vol. 7. P. 279-284.
9. Puechmorel S., Delahaye D. New trends in air traffic complexity. *ENRI International Workshop on ATM/CNS*. Mar 2009. Tokyo, Japan. P. 55-60.
10. Hopkin V. D. The Impact of Automation on Air Traffic Control Systems. In J. A. Wise, V. D. Hopkin, & M. L. Smith (Eds.). *Automation and Systems Issues in Air Traffic Control*. 1991. P. 3-19.
11. Endsley M. R., Kiris E. O. The out-of-the-loop performance problem and level of control in automation. *Human Factors*. 1995. Vol. 37 (2). P. 381-394.
12. Kirwan B. The role of the controller in the accelerating industry of air traffic management. *Safety Science*. 2001. Vol. 37. P. 151-185.
13. Le Goff M. Stress et contrôle aérien, UD report, Université Pierre and Marie Curie – Paris VI, Paris. 1998. 54 p.
14. Zeier H., Grubenman E. Enquête sur le stress auprès des contrôleurs du trafic aérien de Swisscontrol. *Eidgenössische Technische Hochschule, Institut für Verhaltenswissenschaft, Zürich*. 1990. 56 p.
15. Managing stress in ATM. EUROCONTROL, March 2020. 88 p. URL: <https://skybrary.aero/sites/default/files/bookshelf/5628.pdf> (date of access: 21.07.2024).
16. Costa G. Working and health conditions of Italian air traffic controllers. *International Journal of Occupational Safety and Ergonomics*. 2000. Vol. 6 (3). P. 365-382.
17. Christian M. S., Bradley J. C., Wallace J. C., Burke M. J. Workplace safety: A meta-analysis of the roles of person and situation factors. *Journal of Applied Psychology*. 2009. Vol. 94 (5). P. 1103-1127. URL: <https://doi.org/10.1037/a0016172> (date of access: 21.07.2024).
18. Dunn L. B., Iglewicz A., Moutier C. A. Conceptual Model of Medical Student Well-Being: Promoting Resilience and Preventing Burnout. *Acad Psychiatry*. 2008. Vol. 32. P. 44-53. URL: <https://doi.org/10.1176/appi.ap.32.1.44> (date of access: 21.07.2024).
19. Hermosilla G. D., De La Flor R. A., Asuero M. A. Clear to Calm – A Pilot Study on the Effectiveness of Mindfulness-Based Stress Reduction Program in ATM. *HindSight 2020 Spring-1*. 3 p. URL: <https://skybrary.aero/bookshelf/hindsight-30-clear-calm-pilot-study-effectiveness-mindfulness-based-stress-reduc>
20. Li Ying, Chen Hongyu, Xin Xiaoyang, Ji Ming. The influence of mindfulness on mental state with regard to safety among civil pilots. *Journal of Air Transport Management*. 2020. Vol. 84. URL: 10.1016/j.jairtraman.2020.101768 (date of access: 21.07.2024).
21. Alaydi B., Ng, S.-I. Mitigating the Negative Effect of Air Traffic Controller Mental Workload on Job Performance: The Role of Mindfulness and Social Work Support. *Safety*. 2024. Vol. 10 (1). 16 p. URL: <https://doi.org/10.3390/safety10010020> (date of access: 25.07.2024).
22. Jetha A., Pransky G., Hettinger L. J. Capturing complexity in work disability research: application of system dynamics modeling methodology. *Disabil Rehabil*. 2015. (ahead-of-print). P. 1-6.
23. Karasek R. Demand/control Model: a social, emotional, and physiological approach to stress risk and active behaviour. ILO Encyclopaedia of Occupational Health and Safety. Geneva: International Labor Organization, 1998. P. 34.6-34.14.
24. Morris A., Ross W., Ulieru M. A system dynamics view of stress: Towards human-factor modeling with computer agents. *Conference Proceedings - IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics*. 2010. P. 4369-4374. URL: <https://doi.org/10.1109/ICSMC.2010.5642412> (date of access: 28.07.2024).
25. Hancock P., Warm J. A Dynamic Model of Stress and Sustained Attention. *Human Factors: The Journal of the Human Factors and Ergonomics Society*. 1989. No. 31. URL: <https://doi.org/10.1177/001872088903100503> (date of access: 21.07.2024).
26. Sant'ana J. L. G., Maldonado M. U., Gontijo L. A. Dynamics of stress generation and reduction in the nursing team at an oncology center. *Revista Latino-Americana de Enfermagem*. 2019. No. 27. URL: <https://doi.org/10.1590/1518-8345.2874.3156> (date of access: 21.07.2024).

Пальоний А.С., Нечипуренко А.Г. МОДЕЛЮВАННЯ ДИНАМІКИ ПРОФЕСІЙНОГО СТРЕСУ В УПРАВЛІННІ ПОВІТРЯНИМ РУХОМ

Предметом статті є професійний стрес серед авіадиспетчерів, ключові фактори, що його спричиняють, та підходи до управління ним у режимі реального часу. Дослідження зосереджене на комплекс-

сному аналізі стресогенних чинників та їх впливу на загальний рівень стресу авіадиспетчерів під час виконання професійних обов'язків. Метою статті є розробка системно-динамічної моделі професійного стресу серед авіадиспетчерів, що враховує різні причини стресу та їх взаємодію, як основи для визначення загального рівня стресу на робочих місцях авіадиспетчерів та створення ефективних стратегій управління стресом в умовах динамічного середовища управління повітряним рухом. Завдання статті: дослідити первинні джерела стресу, притаманні роботі фахівців з управління повітряним рухом, та проаналізувати сучасні підходи до моделювання динамічної природи професійного стресу; виявити та класифікувати фактори, що сприяють підвищенню загального рівня стресу на робочих місцях авіадиспетчерів; побудувати графічну модель взаємозв'язків між групами стресорів та виявити ті з них, що виступають основними посередниками у передачі інформації між іншими типами стресорів; розробити системно-динамічну модель професійного стресу, що ілюструє як прямі, так і зворотні зв'язки між сприйманим загальним рівнем стресу на робочих місцях авіадиспетчерів та факторами, що на нього впливають. Використані методи: логічний аналіз, кластерний аналіз, теорія графів та графо-аналітичний аналіз, а також системно-динамічне моделювання. У дослідженні визначено та класифіковано сукупність стресорів (за їх джерелом), що підвищують відчуття загального стресу серед авіадиспетчерів, кожен з яких має відповідний індекс контрольованості та тривалість впливу. Розроблено системно-динамічну модель професійного стресу, що складається з центрального компонента «рівень професійного стресу авіадиспетчера» та кількох компонентів-агрегаторів, які акумулюють вплив чинників різної природи. Петлі зворотного зв'язку в моделі демонструють потенційні посилюючі ефекти в системі. Наукова новизна одержаних результатів полягає в тому, що концептуальна модель системної динаміки професійного стресу авіадиспетчерів дає наочне уявлення про динамічну природу стресу, якого зазнають авіадиспетчери, та вплив ключових чинників на сприйняття ними стресу під час роботи. Представлена модель може слугувати основою для моніторингу динаміки рівня професійного стресу серед авіадиспетчерів та уможливити ефективне управління стресом з боку керівників змін управління повітряним рухом шляхом розробки та перегляду оперативних, тактичних та стратегічних заходів з подолання стресу.

Ключові слова: авіадиспетчери, професійний стрес, стрес-менеджмент, стресогенні чинники, системна динаміка.

Панаскін Д.В.

Національний технічний університет України

«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

ЗАСТОСУВАННЯ МЕТОДІВ АУГМЕНТАЦІЇ CVAE ДЛЯ ПОКРАЩЕННЯ НАВЧАННЯ НЕЙРОННИХ МЕРЕЖ В АНАЛІЗІ ЛЕГЕНЕВИХ ЗВУКІВ

Стаття присвячена дослідженню нейронних мереж в аналізі легеневих звуків, як додаткового захисту для запобігання та розвитку хворіб дихальних шляхів, а також застосуванню методів аугментації CVAE для покращення навчання нейронних мереж. У статті оцінено можливість використання акустики, яка аналізує шум для визначення ознак легеневих патологій. Показано, що для виявлення патологій доцільно використовувати різницю нормованих рівнів шуму та спектри в логарифмічній шкалі для лівої та правої легені. Доведено, що диференціальна діагностика шумів може бути заснована на використанні модифікованої крос-кореляції функції спектрів у логарифмічному масштабі, а також їх миттєві характеристики за допомогою нейронних мереж. Для збереження різноманіття згенерованих зразків, ми використовували переваги методів аугментації CVAE. Для відображення легеневих звуків ми використовували мережу кодувальника з генерацією реального зображення до прихованого вектора. Потім генератор давав необхідні для реконструкції необроблені пікселі у відповідності характеристикам вихідних зображень із заданим прихованим вектором. При використанні цього методу аугментації можна збільшити різноманітність навчальних даних, що підвищить ефективність.

Представлено технологію двоетапного навчання нейронних мереж (CVAE), яке відрізняється використанням аугментації зображень для попереднього етапу та точності налаштування вагових коефіцієнтів на основі вихідного набору зображень. На першому етапі навчання здійснюється на аугментованих даних, на другому етапі виконується точне налаштування, що сприяє підвищенню ефективності реідентифікації. Отримані результати можуть слугувати основою для створення багатоканальної автоматизованої системи аналізу акустичного шуму для диференціальної діагностики стану легенів, що дозволить створити сучасну систему моніторингу захворювань органів дихання населення.

Ключові слова: медицина, штучний інтелект, захворювання легень, аугментація, діагностика.

Постановка проблеми. В даний час цифрова обробка зображень стала важливою частиною медичної діагностики та має широкий спектр застосування. Аналіз легеневих звуків є важливим кроком у медичній діагностиці. Штучні нейронні мережі, особливо загальні нейронні мережі (CNN), сьогодні є основним інструментом вирішення цієї задачі. Основною проблемою застосування нейронних мереж до вирішення задачі сегментації є необхідність формування порівняно великого набору зображень.

Відомо, що значною мірою на ефективність роботи CNN впливає кількість зображень у навчальній вибірці та їх різноманітність. Недолік тренувальних даних може спровокувати перенавчання CNN, запам'ятовування вихідних даних та нездатність до узагальнення ознак загалом. Вирішенням цієї проблеми може бути концепція перенесення навчання (transfer learning). У такому разі CNN навчається на наборі даних досить великого розміру, наприклад ImageNet (3,2 млн аното-

ваних зображень) [1] або LUPerson (близько 4 млн зображень) [2]. Таким чином, CNN навчається у два етапи. На першому етапі виконується попереднє навчання на великому наборі даних, а на другому етапі коригуються на навчальній вибірці для вирішення конкретної задачі, наприклад виявлення та класифікації об'єктів різних класів [3], застосування методів аугментації.

Дослідження показали, що дворазове збільшення отриманої навчальної вибірки шляхом повторної подачі зображень на вхід нейронної мережі (з виконанням аугментації) дозволяє поліпшити якість сегментації (у середньому на 1–2% за метрикою IoU) і не перенавчити модель. Отже, підготовлений набір даних ще не є оптимальним. Одним із способів збільшення обсягу корисної інформації є застосування різноманітних перетворень вихідних даних. Якщо вихідними даними є зображення, то такими перевагами є афінні перетворення, зміна яскравості, контрастності і т.д., що входять в набір методів аугментації.

Метод регуляризації з використанням аугментації CutMix заснований на застосуванні пакета зображень, яке передбачає заміщення області фрагмента одного зображення областю такого ж розміру іншого зображення з цього пакета [4] (рис. 1, b). Застосування CutMix дозволяє CNN підвищити стійкість до перекриття і при цьому зберігати ту ж частину інформації, що втрачається при використанні методу random erasing. В алгоритмі Mixed Single Thumbnail (MST) [5] фрагмент зображення заміщається на зменшену копію фіксованого розміру іншого зображення з пакета (рис. 1, c). Це дозволяє тимчасово вивчати два зображення при вилученні ознак, підвищуючи стійкість до оклюзій і низької роздільної здатності зображень. Одночасно два зображення з пакету обробляються і при використанні аугментації міхур [6], проте їх об'єднання виконується за допомогою лінійної інтерполяції (рис. 1, d). Такий підхід дозволяє покращити узагальнюючу здатність навченої CNN і знижує чутливість до запам'ятовування помилкових міток, які можуть зустрічатися у існуючих наборах даних.



Рис. 1. Приклади використання методів аугментації даних: а) довільне стирання; б) CutMix; в) MST; г) плутанина [6]

Generative Adversarial Network (GAN) [7] є популярною генеративною моделлю. Вона одно-

часно тренує t -wo моделі: генеративна модель для синтезу зразків і дискримінаційна модель для розрізнення природних і синтезованих зразків. Однак модель GAN складні на етапі навчання та генеруються зразки часто далекі від природних. Наприклад, Wasserstein GAN (WGAN) [8], використовує Earth Mover Distance як ціль для навчання GAN. Популярності набувають методи засновані на CVAE, які включають генерацію умовного обличчя, At-tribute2Image [9], синтез тексту в зображення, прогноз статичних зображень, а також умовний синтез зображень [10]. Усі вони досягають вражаючих результатів.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Результати досліджень, подані в роботах [11-12], показують, що під час навчання задачі класифікації нейронна мережа більше уваги приділяє текстурі об'єкта, а не його формі. Так, в [11] зазначено, що якщо образ kota заповнити текстурою шкіри слона, то CNP розпізнає клас виявленого об'єкта як «слон», тоді як людина вважатиме, що це кіт, т. е. в людини вирішальне значення має саме форма об'єкта, а не його текстура. У роботі [13] пропонується метод аугментації, що складається з кількох етапів. Спочатку CNP навчається на вихідних даних до того моменту, коли значення функції втрат перестають зменшуватися. Після навчання на зображеннях визначаються області, які являються найбільш важливими для ухвалення рішення нейронною мережею.

У роботі [14] для аугментації пропонується метод random erasing, у якому зображення вибираються для перетворень з вихідного набору даних із застосуванням генератора псевдовипадкових чисел (ГПВЧ). На основі ГПВЧ також визначаються розмір та координати фрагмента зображення, пікселі якого заповнюються нульовими чи випадковими значеннями. Тому при завантаженні пакета зображень на різних етапах навчання одне й те саме зображення може бути представлене як у вихідному вигляді, так і з різними-зміненими фрагментами, що дозволяє підвищити стійкість CNN до оклюзій, проте при цьому частина інформації втрачається.

Ефективність попередніх моделей CNN в медичних цілях підтверджена результатами досліджень, опублікованими у роботах [15–16], і зумовлена тим, що на етапі попереднього навчання виділяються ознаки, що несуть основну інформацію про зображення: вертикальні та горизонтальні лінії, колір, текстура та форма об'єктів та ін. Навчання нейронних мереж широко поширене не тільки для вирішення завдань класифікації та розпізнавання

об'єктів на зображеннях, але і для сегментації зображень, пошуку ключових точок та обробки тексту. Застосування таких мереж обмежується наявністю попередньо навчених моделей для кінцевого числа архітектур CNN та високим споживанням обчислювальних ресурсів та часу.

Іншим вирішенням проблеми перенавчання є регуляризація. У машинному навчанні під регуляризацією розуміють додавання обмежень до архітектури нейронної мережі, або до навчальних наборів даних [17]. Прикладами регуляризації є: проріджування нейронних зв'язків CNN; використання різних функцій активації; L1- та L2-регуляризації; аугментація даних, коли частина зображення може бути видалена або заміщена іншою інформацією. Аугментація застосовується для збільшення навчальної вибірки на основі наявних даних [18] за рахунок перетворення зображення. При цьому можуть використовуватися такі перетворення, як зміна яскравості та контраст, дзеркальне відображення, поворот, розмиття та ін. Кількість зображень при аугментації не збільшується, а різноманітність досягається за рахунок того, що на різних етапах навчання до зображень застосовуються різні перетворення. Розширення навчальної вибірки дозволяє поліпшити узагальнюючу здатність CNN і збільшити точність роботи, у тому числі при різних факторах, таких як висока варіація освітлення, низька роздільна здатність, перекриття об'єктів та ін.

Постановка завдання. Мета статті – дослідження нейронних мереж в аналізі легеневого звуку, як додаткового захисту для запобігання та розвитку хворіб дихальних шляхів, а також застосування методів аугментації CVAE для покращення навчання нейронних мереж.

Матеріали та методи. Статистичне опис акустичних шумів, що виникають у процесі дихання, описаний на використанні вкладених двокомпонентних випадкових процесів $\{\vec{S}(t), \theta(t)\}$, у яких одна компонента $\vec{S}(t)$ безперервна, а інша $\theta(t)$ дискретна. Ці компоненти є залежними та, у загальному випадку, не Марківськими. Раніше подібний підхід використовувався для опису нестационарних негаусових перешкод, що створюються відбиттями радіохвиль від поверхні моря, суші, «ясного неба». Він виявився продуктивним і для опису радіолокаційного відбиття від мало-розмірних надводних цілей. Аналогічний підхід використовується і для опису акустичних шумів, викликаних вітром, дощем, листям дерев, кроками людей та тварин, а також звуками пострілів. У процесі дихання виділяються дві фази: вдиху та

видиху. Зміна фазових станів процесу описується квазі детермінованою функцією, на яку не накладається жорсткі обмеження на розподіл часів існування процесу у кожному з фазових станів. Для опису процесу всередині фазового стану використовували стандартні моделі гаусових процесів.

Виклад основного матеріалу. Технології виділення сигнатур шумів за патології легень.

а) Використання усереднених спектрів. Класичний спектральний аналіз як повної структури спектру шумів дихання, так і окремих його фаз (вдиху та видиху) дозволяє здійснювати диференціальну діагностику патології. На рис. 2а наведено спектри шуму везикулярного дихання, ослабленого везикулярного дихання та при початковій стадії пневмонії, а на рис. 2б – різницеві (диференціальні) спектри. Диференціальні спектри дозволяють виявити відмінності в шумах лівої та правої легень, а також пов'язану із цим патологію.

б) Моментні властивості спектрів. Для діагностики можна використовувати моментні характеристики спектрів – його середнє та середньоквадратичне значення частоти, отримані за окремими часовими сегментами:

$$F(t) = \frac{\int_{-\infty}^{\infty} F S(t, F) dF}{\int_{-\infty}^{\infty} S(t, F) dF} = \int_{-\infty}^{\infty} F S(t, F) dF; \sigma(F) = \sqrt{\left(\int_{-\infty}^{\infty} F^2 S(t, F) dF - F(t)^2\right)}, \quad (1)$$

де $S(t, F) = \frac{s(t, F)}{\int_{-\infty}^{\infty} S(t, F) dF}$ – нормований поточний спектр шумів.

Ці характеристики дозволяють оцінювати зміни середньої частоти та ширину спектра шуму при різних фазах дихання. Ще більш інформативним є усереднені спектри і диференціальні спектри різних фаз дихання. Для їх отримання виділяють часову реалізацію акустичних шумів процесу дихання фази вдихів і видихів і для кожної з фаз обчислюються усереднені спектри.

На рис. 3 наведено спектрограми шумів при нормальному диханні та при початковій стадії пневмонії. БПФ оцінювався за сегментами тривалістю близько 0,1с. Патології легень проявляються у часових реалізаціях шуму, їх спектрограмах і спектрах, як поточних, так і середніх, а також моментних характеристиках спектрів, з яких найбільш зручними для аналізу патологій є зміни середніх і середньоквадратичних значень частот. Пропонований підхід відкриває нові можливості для диференціальної діагностики патології легень.

Технологія двоетапного навчання із аугментацією даних. Пропонується використовувати підхід, що включає технологію двоетапного навчання CNN та новий метод аугментації даних. При цьому на першому етапі виконується попереднє навчання на аугментованих даних, а на дру-

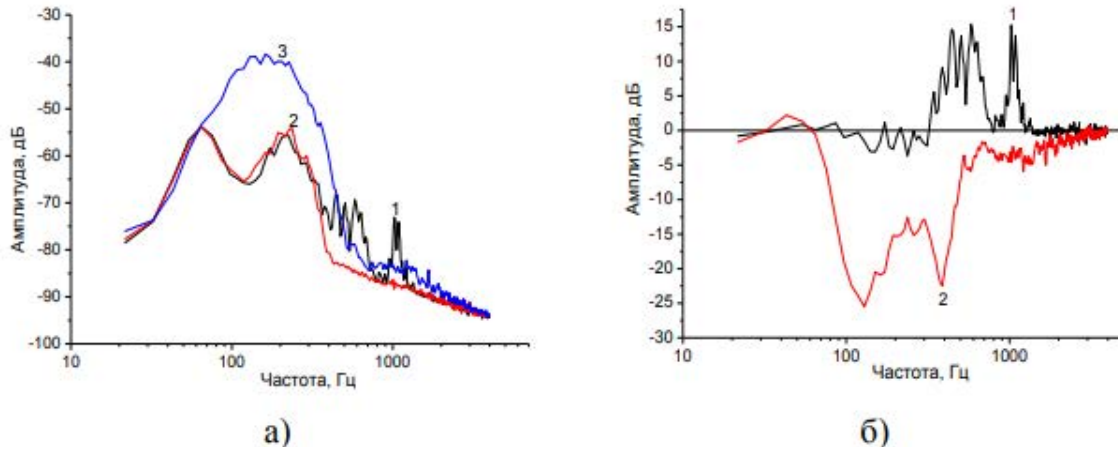


Рис. 2. Спектри (а) при ослабленому (1, 2) везикулярному (3) диханні, а також диференціальні спектри (б) при ослабленому (1) везикулярному (2)

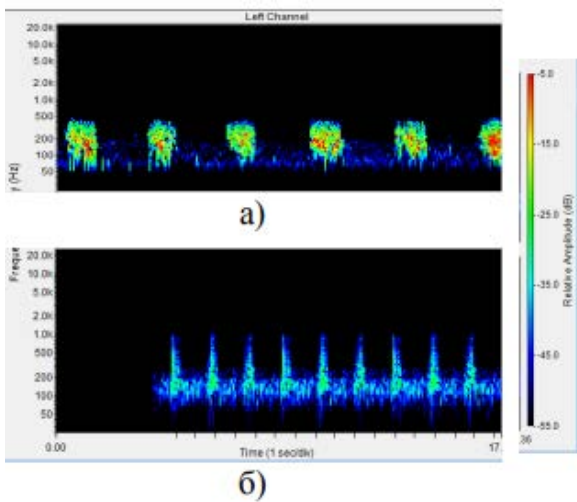


Рис. 3. Спектрограми везикулярного дихання (а) та при пневмонії (б)

гому етапі застосовується точне налаштування CNN, при якій вагові коефіцієнти коригуються на вихідних зображеннях із меншою швидкістю навчання. Це дозволяє отримувати найбільш надійні відмітні ознаки. Для збільшення різноманітності навчальної вибірки на основі наявних даних пропонується використовувати циклічний зсув пікселів по вертикалі та горизонталі, виключення кольоровості та заміщення фрагмента іншим зменшеним зображенням.

Циклічний зсув та виключення кольоровості застосовуються до окремих зображень, а заміщення фрагмента здійснюється зменшеною копією іншого пакета, що подається на вхід CNN. Попереднє навчання моделі та точне налаштування. Для зниження значення функції втрат під час навчання, високі рівні якої викликані неправдоподібністю даних щодо тестових даних, та підвищення точ-

ності повторної ідентифікації пропонується застосовувати двоетапне навчання. При цьому використовували наступні особливості: швидкість тренування класифікаційного шару вища за швидкість всіх інших шарів CNN, на першому етапі здійснюється попереднє навчання із застосуванням аугментації даних, на другому етапі тренування CNN триває тільки на вихідному наборі даних.

Тому ми запропонували використовувати CVAE для навчання нейронних мереж. Як показано на рис. 4, запропонований нами метод складається з чотирьох частин: 1) мережа кодера E; 2) родитивна мережа G; 3) дискримінаційна мережа D; і 4) мережа класифікації C. Функція мереж E і G така ж, як і в умовно-варіаційному автокодері (CVAE) [19]. Ан-мережа кодера E відображає вибірку даних x на латентне представлення передачі z через вивчений розподіл $P(z|x, c)$, де c – категорія даних. Твірна мережа G генерує зображення x' шляхом вибірки з вивченого розподілу $P(x'|z, c)$.

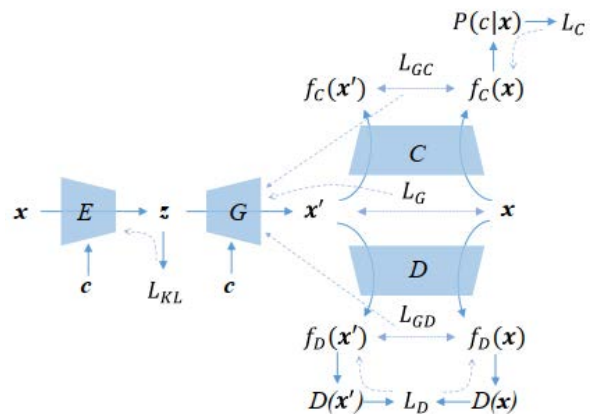


Рис. 4. Ілюстрація структури нашої мережі. Наша модель містить чотири частини: 1) мережа кодера E; 2) твірна мережа G; 3) класифікаційна мережа C; та 4) дискримінаційна мережа робота D

Функція мережі G і D така ж, як в генеративній змагальній мережі (GAN). Мережа G намагається дізнатися реальний розподіл даних за допомогою дієнтів, заданих дискримінаційною мережею D, яка навчається розрізняти «справжні» та «фальшиві» аугментційні дані. Функціональною мережею C вимірювали зсуви везикулярного дихання P (с|x). Однак комбінація VAE і GAN є недопустимою. Остання робота [20] показує, що навчання GAN страждатиме від проблеми зникнення градієнта або нестабільності мережі G. Тому ми лише пропонуємо використовувати генеративну мережу CVAE для покращення аналізу легеневи́х захворювань.

Лістинг. Алгоритм вибору зображень та спектрограм везикулярного дихання та дихання при ушкодженнях легень, для яких виконується перетворення.

1. Input: I_{in} – вхідне зображення
2. p – відсоток зображень, до яких застосовується перетворення
3. Transform – перетворення
4. Output: I_{out} – вихідне зображення
5. Initialization: $r \leftarrow \text{Rand}(0,1)$;
6. $t=p/100$
7. if $r > t$ then
8. $I_{out} \leftarrow I_{in}$;
9. return I_{out} .
10. else
11. $I_{out} \leftarrow \text{Transform}(I_{in})$;
12. return I_{out} .
13. end

Для виявлення патологій доцільно використовувати різницю нормованих рівнів спектрів шуму

в логарифмічному масштабі для лівого і правого легенів. Для бінарної системи легенів необхідно сформулювати координати обмежувальної рамки вирівнювального фрагмента $E = (r_x, r_y, r_w, r_h)$, де r_x, r_y – координати лівого нижнього кута; r_w і r_h – висота та ширина віддаленої ділянки, які визначаються за допомогою CVAE таким чином, що r_h становить $(0,25 \dots 0,5 H)$, де H – Висота вихідного зображення. Ширина визначається як: $r_w = \left\lceil \frac{r_h}{\eta} \right\rceil$, де $\eta = \left\lfloor \frac{H}{W} \right\rfloor$ – співвідношення сторін вихідного зображення. Застосування технології двоетапного навчання та запропонованого методу аугментації надано для СНР ResNet-50, навченої на різних наборах даних, дозволило підвищити точність на 4,18–21,55%.

Висновки. Захворювання легень займають одне з перших місць за втратами працездатності у всіх країнах світу. Дослідження в даній галузі та роботи у цьому напрямі еволюціонують у міру розвитку обчислювальної техніки, типів датчиків, методів штучного інтелекту в галузі діагностики та прийняття рішень, засобів телемедицини. Зображення спектрограм шумів при нормі та патології можна використовувати для виявлення патологій з використанням підходи використовуваних при розпізнаванні образів. При цьому обчислення віконного перетворення Фур'є доцільно проводити за сегментами тривалістю близько 0,1 сек. Розглянуто можливість використання різних технологій аналізу акустичних шумів для визначення сигнатур патології легень. Це може стати основою створення багатоканальної автоматизованої системи діагностики стану легень.

Список літератури:

1. ImageNet: A large-scale hierarchical image database / J. Deng [et al.] // 2009 IEEE Conf. on Computer Vision and Pattern Recognition, Miami, FL, USA, 20–25 June 2009. Miami, 2009. P. 248–255. <https://doi.org/10.1109/CVPR.2009.5206848>
2. Unsupervised pre-training for person re-identification / D. Fu [et al.] // 2021 IEEE/CVF Conf. on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR), Nashville, TN, USA, 20–25 June 2021. Nashville, 2021. P. 14745–14754. <https://doi.org/10.1109/CVPR46437.2021.01451>
3. Performance Measures and a Data Set for Multi-target, Multi-camera Tracking / E. Ristani [et al.]. 2016. Mode of access: https://doi.org/10.1007/978-3-319-48881-3_2. Date of access: 11.08.2024.
4. CutMix: Regularization strategy to train strong classifiers with localizable features / S. Yun [et al.] // 2019 IEEE/CVF Intern. Conf. on Computer Vision (ICCV), Seoul, Korea (South), 27 Oct. - 2 Nov. 2019. Seoul, 2019. P. 6022–6031. <https://doi.org/10.1109/ICCV.2019.00612>
5. Cut-thumbnail: A novel data augmentation for convolutional neural network / T. Xie [et al.] // Proc. of the 29th ACM Intern. Conf. on Multimedia, Virtual Event, China, 20–24 Oct. 2021. Virtual Event, China, 2021. P. 1627–1635. <https://doi.org/10.1145/3474085.3475302>
6. Mixup: Beyond Empirical Risk Minimization / H. Zhang [et al.]. 2018. Mode of access: <https://doi.org/10.48550/arXiv.1710.09412>. Date of access: 11.08.2024.
7. Person transfer GAN to bridge domain gap for person re-identification / L. Wei [et al.] // 2018 IEEE/CVF Conf. on Computer Vision and Pattern Recognition, Salt Lake City, UT, USA, 18–23 June 2018. Salt Lake City, 2018. P. 79–88. <https://doi.org/10.1109/CVPR.2018.00016>
8. M. Arjovsky, S. Chintala, and L. Bottou. Wasserstein gan. arXiv preprint arXiv:1701.07875, 2017.

9. X. Yan, J. Yang, K. Sohn, and H. Lee. Attribute2image: Conditional image generation from visual attributes. arXiv preprint arXiv:1512.00570, 2015.
10. J. Walker, C. Doersch, A. Gupta, and M. Hebert. An uncertain future: Forecasting from static images using variational autoencoders. In European Conference on Computer Vision, pages 835–851. Springer, 2016.
11. ImageNet-Trained CNNs are Biased Towards Texture; Increasing Shape Bias Improves Accuracy and Robustness / R. Geirhos [et al.]. 2019. Mode of access: <https://doi.org/10.48550/arXiv.1811.12231>. Date of access: 11.08.2024.
12. Gong, Y. An Effective Data Augmentation for Person Re-identification / Y. Gong, Z. Zeng. 2021. Mode of access: <https://doi.org/10.48550/arXiv.2101.08533>. Date of access: 11.08.2024.
13. Adversarially occluded samples for person re-identification / H. Huang [et al.] // 2018 IEEE/CVF Conf. on Computer Vision and Pattern Recognition, Salt Lake City, UT, USA, 18–23 June 2018. Salt Lake City, 2018. P. 5098–5107. <https://doi.org/10.1109/CVPR.2018.00535>
14. Random Erasing Data Augmentation / Z. Zhong [et al.]. 2020. Mode of access: <https://doi.org/10.1609/AAAI.V34I07.7000>. Date of access: 11.08.2024.
15. DeVries, T. Improved Regularization of Convolutional Neural Networks with CutOut / T. DeVries, G. W. Taylor. 2017. Mode of access: <https://doi.org/10.48550/arXiv.1708.04552>. Date of access: 11.09.2024.
16. Dropout: A simple way to prevent neural networks from overfitting / N. Srivastava [et al.] // J. of Machine Learning Research. 2014. No. 15. P. 1929–1958. <https://doi.org/10.5555/2627435.2670313>
17. Choice of activation function in convolution neural network for person re-identification in video surveillance systems / H. Chen [et al.] // Programming and Computer Software. 2022. Vol. 48, № 5. P. 312–321. <http://doi.org/10.1134/S0361768822050036>
18. Deep residual learning for image recognition / K. He [et al.] // 2016 IEEE Conf. on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR), Las Vegas, NV, USA, 27–30 June 2016. Las Vegas, 2016. P. 770–778. <https://doi.org/10.1109/cvpr.2016.90>
19. K. Sohn, H. Lee, and X. Yan. Learning structured output representation using deep conditional generative models. In Advances in Neural Information Processing Systems, pages 3483–3491, 2015.
20. M. Arjovsky and L. Bottou. Towards principled methods for training generative adversarial networks. In NIPS 2016 Workshop on Adversarial Training. In review for ICLR, volume 2016, 2017.

Panaskin D.V. APPLICATION OF CVAE AUGMENTATION METHODS TO IMPROVE LEARNING OF NEURAL NETWORKS IN LUNG SOUND ANALYSIS

The article is dedicated to the study of neural networks in the analysis of lung sounds as an additional safeguard for the prevention and development of respiratory diseases, as well as the application of CVAE augmentation methods to improve neural network training. The article evaluates the feasibility of using acoustics, which analyzes noise to detect signs of pulmonary pathologies. It is shown that for the detection of pathologies, it is advisable to use the difference in normalized noise levels and logarithmic scale spectra for the left and right lungs. It is proven that differential noise diagnostics can be based on the use of modified cross-correlation of logarithmic scale spectra, as well as their instantaneous characteristics with the help of neural networks. To preserve the diversity of generated samples, we utilized the advantages of CVAE augmentation methods. To visualize lung sounds, we used an encoder network with real image generation to the latent vector. The generator then provided the raw pixels necessary for reconstruction in accordance with the characteristics of the original images with a given latent vector. Using this augmentation method, it is possible to increase the diversity of training data, which will improve efficiency.

A two-stage neural network training technology (CVAE) is presented, which is distinguished by the use of image augmentation for the preliminary stage and precise adjustment of weight coefficients based on the original image set. In the first stage, training is performed on augmented data, while in the second stage, fine-tuning is carried out, contributing to the improvement of re-identification efficiency. The obtained results can serve as a basis for the creation of a multi-channel automated acoustic noise analysis system for the differential diagnosis of lung conditions, which will allow the development of a modern monitoring system for respiratory diseases in the population.

Key words: *medicine, artificial intelligence, lung diseases, augmentation, diagnostics.*

Пацьора А.А.

Національний університет біоресурсів і природокористування України

МОДЕЛІ ТА ІНФОРМАЦІЙНА ТЕХНОЛОГІЯ АДАПТАЦІЇ ОСВІТНЬОГО ПРОЦЕСУ ДО WEB 3.0

Стаття присвячена вивченню переваг, перспектив застосування та впливу на освіту Web 3.0 – технологій. Автор зазначає, що впровадження Web 3.0 змінить не лише сприйняття людей, а й способі їх взаємодії в мережі Інтернет. Це буде досягнуто через нові функції та інструменти, які виходять далеко за межі звичних соціальних мереж. Серед таких інструментів можна виділити особистих помічників, розумних агентів, 3D-ігри, віртуальні світи, а також відкриті освітні ресурси, що стануть доступними для користувачів. Web 3.0 пропонує значно ширші можливості, ніж попередні покоління Інтернету, зокрема через нові способи організації даних та інтеграції інформаційних ресурсів. Web 3.0 – технології мають чотири ключові риси, які відрізняють їх від попередніх технологічних етапів. Це інтелект, персоналізація, сумісність та віртуалізація. Кожна з цих характеристик відіграє важливу роль у формуванні майбутньої екосистеми Web 3.0 і має суттєвий вплив на освітню сферу. У статті застосовано методи комплексного теоретичного аналізу, а також описові методи, щоб розкрити всі ці аспекти. Особливий акцент зроблено на тих інструментах та сервісах, які вже сьогодні використовуються в освітній діяльності та в інших галузях. Наприклад, семантичні цифрові бібліотеки, віртуальні 3D-бібліотеки, семантичні блоги, мікроблогінг, віртуальні світи й аватари, віртуальні освітні лабораторії, а також інтелектуальні системи пошуку.

Наукова новизна цієї роботи полягає у глибокому аналізі нових інструментів Web 3.0, які поступово інтегруються в різні сфери життя, включно з освітою. Практична значущість дослідження зосереджується на вивченні можливостей використання цих інструментів для підвищення ефективності освітньої діяльності. Приділено увагу тим аспектам, які дозволять зробити навчання більш інтерактивним і персоналізованим. Результати дослідження свідчать про те, що семантична Web 3.0 мережа передбачає активне використання персональних помічників, інтелектуальних агентів, віртуальних світів та відкритих освітніх ресурсів, що сприяє покращенню системи управління знаннями та забезпеченню більшої доступності освітніх матеріалів.

Особливу увагу приділено інтелектуальним агентам та особистим помічникам, які допомагають учням організувати власне навчання. За допомогою таких інструментів вони зможуть ставити конкретні освітні цілі, контролювати їх досягнення та ефективніше використовувати час і ресурси для навчання. Це дає можливість зробити процес навчання гнучким, динамічним і адаптивним до потреб кожного учня, що є важливим у сучасній освіті.

Ключові слова: Web 3.0, освітній процес, адаптація, інформаційні технології, моделі навчання, семантичний веб, штучний інтелект, машинне навчання, 3D-Ігри, віртуальний світ, семантична цифрова бібліотека, віртуальна 3D бібліотека, віртуальна освітня лабораторія, інтелектуальний пошук.

Постановка проблеми. В загальному вигляді і її зв'язок з важливими науковими і практичними завданнями. Інтернет постійно розвивається, підтвердженням чого є факт появи семантичної мережі або Web 3.0-технологій на думку Бернерс Лі «семантична павутина структурує змістовне наповнення веб-сторінок, створюючи середовище, в якому агенти програмного забезпечення переміщуються зі сторінки на сторінку, легко виконуючи складні завдання для користувачів» [1].

Вважається, що Web 3.0 змінить сприйняття і взаємодію людей в мережі Інтернет з впровадженням функцій і інструментів, що виходять далеко за рамки соціальних мереж:

- особисті помічники;
- розумні агенти;
- 3D-Ігри;
- віртуальні світи;
- відкриті освітні ресурси і т. д.

Елементом новизни, привнесеної семантичною мережею, є адаптація контенту для конкретного користувача. Пошук в мережі Інтернет не буде приводити до великого списку веб-сайтів, на яких Користувач повинен шукати необхідну інформацію, а буде створюватися мультимедійний файл, в якому зміст перетворюється, персоніфікується і адаптується для користування конкретною особою. Семантична мережа або Web 3.0 також

передбачає створення віртуальних персональних помічників або агентів, що допомагають користувачеві знайти відповідну інформацію за короткий проміжок часу. Аналіз останніх досліджень та публікацій, які розглядали аспекти цієї проблеми. Наступні сучасні автори в своїх роботах вивчають питання застосування Web 3.0 – технологій в області освіти: Rajiv and Manohar Lal [2], Ana-Maria Chlsega [3] та інші.

Постановка завдання. Цілі даної статті: вивчити переваги, перспективи застосування та вплив на освіту Web 3.0 – технологій.

Розглянемо чотири основні риси, що характеризують Web 3.0 технології. Першою рисою Web 3.0. є інтелект. Вчені відзначають, що одна з найперспективніших особливостей – це інтернет з інтелектуальними функціями, тобто інтелектуальний Інтернет. Додатки працюватимуть «розумно», використовуючи взаємодію між людьми та комп'ютерами. Різні інструменти і технології, що працюють на основі штучного інтелекту (наприклад, неточна множина, нейронні мережі) будуть інтегровані в додатки. Такі програми Web 3.0 будуть виконувати безпосередньо Інтелектуальний аналіз і приймати рішення навіть без втручання користувача [4].

Другою відмінною рисою Web 3.0 є персоналізація. Особисті або індивідуальні переваги будуть враховуватися в процесі виконання різних дій, таких як обробка інформації, Пошук, формування персоналізованого порталу в мережі. Семантична павутина буде головною технологією персоналізації в Web 3.0 [5].

У контексті Web 3.0 терміни Сумісність, узгодженість, співпраця і можливість багатократного використання в основному взаємопов'язані. Суміс-

ність (узгодженість) передбачає повторне використання, що знову ж таки є формою співпраці. Технології Web 3.0 є комунікаційним способом обміну знаннями та інформацією. Додатки Web 3.0 будуть просто налаштовуватися і автономно працювати на різних видах пристроїв. Програми на базі Web 3.0 працюватимуть на багатьох типах комп'ютерів, портативних пристроях, мобільних телефонах, телевізорах, автомобілях та багатьох інших. Мережа, що поширюється – термін, який використовується для опису цього явища, коли мережа функціонує для широкого діапазону електронних пристроїв. Web 3.0 – це мережа Інтернет з високошвидкісною пропускною здатністю, що підтримує 3D-графіку, яку легко використовувати для віртуалізації. Тренд для майбутньої павутини відноситься до створення віртуальних тривимірних навчальних середовищ. Прикладом такого 3D-веб-додатку є «друге життя» (англ. Second Life [6].

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Web 3.0 – це технології пропонують безліч інструментів і сервісів, що використовуються в освіті та інших областях: семантичні цифрові бібліотеки, віртуальні 3D-бібліотеки, семантичні блоги, мікроблогінг, віртуальні світи і аватари, віртуальні освітні лабораторії, інтелектуальний пошук і інтелектуальні навчальні системи та ін. (рисунок 1).

Навчання за допомогою 3D-вікіпедія і віртуальних 3D-енциклопедій дозволяє одному або декільком користувачам створювати базу знань в наборі взаємопов'язаних веб-сторінок (процес створення і редагування сторінок). А Вікіпедія відіграє важливу роль у створенні, публікації, редагуванні контенту та у співпраці з метою створення знань. Студенти мають можливість працювати спільно над проектами зі створення

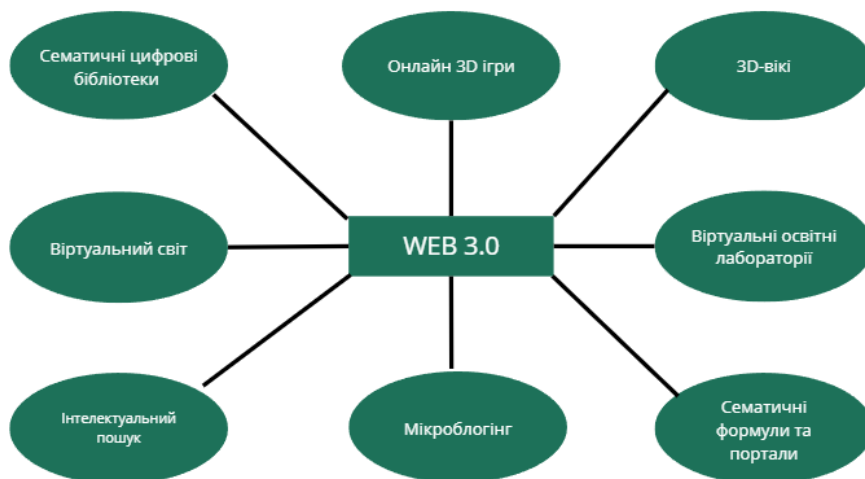


Рис. 1. Інструменти Web 3.0

веб-сторінок. З розвитком мережі Інтернет багато авторів і дослідників працюють над новими проектами для віпідедії та енциклопедій. Прикладом такого роду технологій є програмне забезпечення Sorernicus-3D Вікіпедія [7]. Припустимо, що користувач виконав пошук і вибрав один з результатів, пов'язаних з інформацією про конкретну географічну область, камера перейде в конкретне місце на обертовому земному кулі і потім відправить вам відповідну аудіо або відео інформацію. 3D-Вікі зможе надати ефективне середовище навчання для учнів, щоб вони могли краще впливати на освітній процес.

Навчання за допомогою 3D-віртуального світу, який являє собою поєднання 3D-ігрових технологій, доповненої реальності, імітаційного середовища та інтернет-технологій, в якому користувачі взаємодіють через аватари. Користувачі створюють аватари в мережі Інтернет і дозволяють їм знаходитися в віртуальних світах. Студенти можуть створювати власні аватари в Інтернеті та жити в цих світах. Віртуальні світи можна розглядати як початок нової ери електронного навчання, оскільки вони дозволяють учням брати участь у рольовому 3D-моделюванні, імітаційному моделюванні, креативності та їх активній участі. Це створює великий простір для проведення досліджень, що стосуються педагогічної вигоди від навчання і викладання в 3D віртуальних світах. Кілька 3D-віртуальних світів, таких як «друге життя» (англ. Second Life), IMVU, «активні світи» (англ. Active Worlds) привернули увагу студентів і викладачів до освіти і вивчення всього світу. Педагоги та учні можуть спільно навчатися у віртуальному 3D-просторі, будучи географічно віддаленими один від одного. Віртуальний простір дозволяє викладачам і учням проводити зустрічі, семінари, презентації, цифрові виставки, де учні можуть взаємодіяти так само, як і в реальному житті. 3D-віртуальні світи, доступні сьогодні і в майбутньому, будуть дуже допомагати в навчанні різних дисциплін в галузі освіти, медицини, економіки, торгівлі, науки, мистецтва, архітектури, комп'ютерних наук і так далі.

Важливою відмінністю Web 3.0 є інтелектуальні пошукові системи. В даний час Інтернет став найкориснішим і потужним джерелом інформації. Для ефективної роботи з величезним обсягом інформації в мережі Інтернеті були розроблені спеціальні пошукові системи для вирішення завдань отримання та актуальної інформації в мультимедійній формі для своїх користувачів [8].

Коли ви використовуєте традиційний Веб-пошук, Пошукова система не здатна

по-справжньому зрозуміти ваш пошук. Вона виконує пошук веб-сторінок, що містять введені ключові слова. Пошукова система не може самостійно визначити, чи є веб-сторінка релевантною для пошуку користувача. Web 3.0-агенти інтелектуальної пошукової системи не тільки знаходять необхідну інформацію за ключовими словами, але також інтерпретують контекст отриманого запиту [9]. Вчені вважають, що завдяки Web 3.0 кожен користувач матиме унікальний профіль в мережі Інтернет, заснований на історії переглядів цього користувача. Це означає, що якщо двоє різних учнів одночасно шукали однакові ключові слова в Інтернеті, вони отримають абсолютно різні результати, визначені їх індивідуальними профілями.

Студенти також отримують вигоду від створення бази знань на основі семантичної мережі. Агенти пошукової системи повертають мультимедійний звіт, а не просто список сайтів. Розумний агент допоможе знайти необхідні лекції, відповідні блоги, книги і по темі для учня, виконувати пошук навчальних матеріалів на основі потреб учнів [10]. Студенти можуть використовувати однакові можливості пошуку з іншими мультимедійними об'єктами, такими як зображення, аудіо та відео. Деякі приклади такого роду технологій можна знайти на такому програмному забезпеченні як Ojas Priya (інструмент для обміну фотографіями), який дозволяє автоматично маркувати зображення за допомогою розпізнавання обличчя, або Like.com, що дозволяє користувачеві шукати продукти на основі подібних зображень.

Онлайн 3D-віртуальні лабораторії (або освітні лабораторії) – це потужні графічні інтерфейси для участі користувачів у спільній роботі та виконанні проектів, обміну інформацією та результатами діяльності. Розрізняють наступні віртуальні 3D-лабораторії, які будуть формувати майбутню освіту:

- відвідування місць, які недоступні; відвідування різних місць у віртуальних світах: наприклад, стародавніх місць, таких як Тадж-Махал, Рим, Греція, єгипетські піраміди. У таких екскурсіях студенти можуть взаємодіяти з навколишнім середовищем, вивчати її;

- сприяння співпраці студентів. Студенти можуть зустрічатися віртуально, співпрацювати та співпрацювати над спільними навчальними проектами. Також, студенти та викладачі можуть обговорювати і спілкуватися по загальним проектам і питанням;

- сприяння проведенню експериментів на основі проектів. Наприклад, студенти можуть

проводити дослідження та створювати віртуальне село в, скажімо, Римській імперії. Крім того, ціла група студентів з усього світу може створити таке середовище, вивчаючи конкретний курс навчання. Таким чином, студенти можуть працювати разом над проектами та мати можливість дистанційного навчання.

Виклад основного матеріалу. На ранніх стадіях Web 3.0 розвивається завдяки новій технічній інфраструктурі, яка полегшує обмін між користувачами, багато з яких фінансові. Наприклад, технології блокчейну дозволяють записувати та розповсюджувати цифрову інформацію, але не редагувати її, щоб записи про комерційні операції не можна було змінити, видалити чи знищити. Блокчейн привабливий для покупців і продавців, оскільки цифрові фінансові транзакції безпечні, а можливість шахрайства віддалена.

Крім того, користувачам Інтернету більше не потрібно буде входити в гігантські технологічні компанії. Натомість користувачі Web 3.0 зберігають право власності на свою онлайн-діяльність і можуть відстежувати всю інформацію, якою вони діляться в Інтернеті, через уніфікований профіль, який зберігається в блокчейні. Нарешті, користувачі можуть здійснювати транзакції Web 3.0, не покладаючись на уряди, установи чи корпорації (принаймні теоретично). Блокчейни є базовою технологією для систем криптовалют, таких як біткойн, оскільки вони забезпечують як безпечний, так і децентралізований запис транзакцій.

Web 3.0 також характеризується зростанням кількості невзаємозамінних токенів (NFT), які дозволяють купувати та продавати єдині в своєму роді цифрові предмети колекціонування (та інші цифрові артефакти) за криптовалюту. Незамінні токени не ідентичні один одному, тому вони представляють унікальні «токени», які існують у блокчейні, і їх неможливо відтворити. По суті, це унікальні активи, які представляють матеріальні предмети реального світу, такі як твори мистецтва та нерухомість. (Перший твір мистецтва NFT, проданий на аукціоні, «Everdays: The First 5000 Days», за 69 мільйонів доларів.)

Незважаючи на ці технологічні досягнення, цілком імовірно, що Web 3.0 існуватиме поряд із Web 2.0 ще досить довго, а не повністю замінить його. По-перше, здається малоімовірно, що Facebook, Google і Twitter легко відмовляться від своєї значної частки в контролі над Інтернетом. (Справді, Facebook інвестувала мільярди доларів у створення інтерактивного цифрового середо-

вища «метавсесвіту» для користувачів Інтернету). Крім того, існує занепокоєння, що децентралізований Інтернет призведе до зростання кіберзлочинності та неправдивої інформації. Також можливо, що технології Web 3.0 не забезпечать повністю децентралізовану взаємодію, яка не залежить від компанії чи уряду. Іншими словами, багато чого ще належить побачити.

Web 3.0 – це децентралізація, позбавлення інституцій їх консолідованої влади та передача цієї влади окремим особам. Децентралізований Інтернет може послабити потужність навчальних закладів, але надасть студентам більше можливостей для навчання.

Повноваження навчатися та передавати знання не належить одній одній установі, але сучасна освітня система ставить установу – школу, університет тощо – на перше місце у навчанні студентів. Заклад вирішує, який зміст мають вивчати учні, як вони це вивчають і як довго.

Учні, які навчаються в традиційній школі, обмежують свої можливості навчатися в інших середовищах і в інших експертів. У децентралізованому навчальному середовищі студенти більше не зв'язані формальними обмеженнями, накладеними адміністрацією школи чи університету. У міру розвитку Web 3.0 і метавсесвіту Інтернет дедалі більше надаватиме студентам доступ до цінних ресурсів і навчальних експертів, а також навчатиметься в мультимедійних середовищах із повним зануренням, які використовують як фізичний, так і цифровий світ. Таким чином, з'являться більш імерсивні спеціальні програми або «мікрошколи» (малі навчальні спільноти). Одним із прикладів є метавсесвіт STEM (мережа віртуальних світів) для дітей віком 6–14 років, який використовує живу віртуальну багатокористувацьку гру для вивчення наукових тем. Домашнє навчання також стане більш поширеним, оскільки у батьків є все більш надійна серія навчальних ресурсів і експертів, на яких вони можуть спиратися.

Навчальні заклади, і, зокрема, університети, зберегли значну владу завдяки своїй здатності пропонувати повноваження, які допомагають забезпечити професійний і соціально-економічний розвиток. Традиційно диплом середньої школи та університет був обов'язковим для студентів, які бажають отримати роботу за багатьма бажаними професіями. Однак Web 3.0 може спростити для людей реєстрацію на заняття, не покладаючись на традиційні програми отримання ступеня. Студенти могли купити доступ до курсів, фактично не вступаючи до навчального закладу. Завдяки

блокчейну студенти також можуть записувати свої власні досягнення в навчанні, не покладаючись на контрольовані університетом стенограми.

Таким чином, установа не буде єдиним зберігачем облікових даних. Студент зможе створити навчальне портфоліо на блокчейні, яке може містити пройдені курси, освітні NFT, нагороди, проекти, рекомендації тощо. Іншими словами, учень може відобразити відповідний досвід навчання на загальнодоступному та незмінному екрані. Оскільки інформацію неможливо підробити, це чудовий засіб для відображення завершених курсів і програм, підтверджених установчими підписами.

Web 3.0 також побачить зростання освітніх DAO (децентралізованих автономних організацій). DAO – це групи людей, об'єднаних спільним бажанням видалити ієрархію з онлайн-структури. В даний час багато DAO орієнтовані на бізнес і шукають шляхи розширення доступу до інформації, усунення бюрократії та скорочення витрат існуючих установ. Тим не менш, починають з'являтися «навчальні DAO», спрямовані на навчання членів групи певній темі.

Цілком імовірно, що з'являться конкретні навчальні DAO, зосереджені на вдосконаленні освітніх онлайн-систем. Неважко уявити «EdDAO», які пропонують онлайн-класи та курси, якщо не зовсім спеціальні програми. У розпал COVID-19 «навчальні капсули» стали альтернативним методом навчання учнів, оскільки кластери батьків об'єдналися, щоб усунути недоліки в освітній системі. Поки що занадто рано говорити про те, чи може невдоволення школами спонукати певні EdDOA створювати альтернативні навчальні середовища для учнів, але це цілком імовірно.

Більш радикальні бачення Web 3.0 передбачають, що школи діють як бізнеси, продають криптовалюту та NFT для збору грошей. Але школи вкорінилися, інституції консервативні, і будь-які зміни відбуватимуться повільно та важко. На сьогоднішній день шкільні адміністратори та вчителі з обережністю ставилися до децентралізованих онлайн-навчальних середовищ, де вони не могли контролювати діяльність учнів. Вони були дуже схильні вибирати онлайн-«города» – такі як Google for Education – які надають набір онлайн-інструментів, доступ до яких здійснюється через шкільні облікові записи, які легко контролювати.

Web 3.0 з часом принесе зміни в освіту, але школи та університети протистоятимуть цьому – особливо незалежності студентів у блокчейнах. Отже, буде цікаво подивитися, як навчальні заклади

реагують на потужні сили, що змінюють нашу взаємодію в Інтернеті.

Моделі Адаптації Освітнього Процесу до Web 3.0. Web 3.0 – це перехід від концепції, орієнтованої на всебічний розвиток цифрового простору за допомогою діяльності користувачів, тобто контенту, який має форму, придатну для обробки тільки людиною; до концепції мережі унікальних інформаційних об'єктів, які будуть оброблятися машинами. Іншими словами, це безліч онлайн-сервісів, що надають повний спектр засобів внесення, редагування, пошуку і відображення будь-якого типу контенту користувачами-експертами. Основна мета використання потенціалу семантичних технологій в бібліотеці це сприяння відкритості бібліотечних колекцій і оптимізації процесів їх пошуку і використання, тобто створення «бібліотеки без кордонів», в якій інформаційні об'єкти можуть бути легко доступні користувачам незалежно від їх фізичного розташування, виду, обсягу, формату та ін.

Для бібліотек технології Web 3.0 пророкують появу ресурсів, де буде здійснюватися агрегація всіх необхідних користувачеві сервісів, інструментів професійної складової і публікація контенту, модельованого експертами [12]. По суті, сама бібліотека на основі використання Semantic Web отримає можливість виступати експертом і інтегрувати інформацію, засновану на різних метаданих, отриманих з мережі, (наприклад на соціальних ресурсах, в профілях користувачів, завдяки таксономії і т.п.); і забезпечувати взаємодію, а також більш надійний, зручний семантичний пошук. Перспективним напрямком застосування Web 3.0 для бібліотеки також є створення віртуальних спільнот читачів-експертів, експертних колекцій, спеціалізованих ресурсів та ін. Web 3.0 дозволить визначати привабливість колекцій і простоту використання технологій, як ключових факторів оцінки якості ресурсів бібліотек. Крім того, завдяки технологічним перевагам Web технологій третього покоління значно зросте якість персоналізованих бібліотечних послуг, стане можливим врахування індивідуальних характеристик користувача, що дуже необхідно при обслуговуванні осіб з особливими потребами. Перспективним стане застосування бібліотеками технологій Web 3.0 для реалізації освітніх функцій. Завдяки освоєнню Web 3.0 бібліотека отримає потужні інструменти для організації нових форм і підвищення якості обслуговування користувачів, формування іміджу і авторитетну позицію в інтернет-комунікаціях і поступово буде формувати свою нішу шляхом створення інтелектуальних агрегованих ресурсів,

відбір, оцінку і координацію використання користувачами.

Сьогодні також можна окреслити деякі перспективи для бібліотек щодо використання технологій Web 4.0 і Web 5.0. Так в зарубіжних бібліотеках знаходять місце новітні інноваційні та перспективні технології четвертого покоління або Іот, так званий «Інтернет речей» обчислювальної мережі фізичних предметів («речей»), оснащених вбудованими технологіями для взаємодії один з одним або з зовнішнім середовищем [13]. Головним стимулюючим фактором розвитку Іот, в цифровому просторі є інтеграція декількох технологій і комунікаційних рішень з метою отримання безпрецедентного за своєю функціональністю інструментарію перекладу в цифровий вид інформації про об'єкти реального світу, людей і події; автоматизації процесів її обробки, управління контролю, відстеження та аналітики т. д.

Бібліотечні установи, як і деякі галузі промисловості, медицина, логістика, в певному сенсі вже отримали позитивний досвід використання технологій, пов'язаних з одним з аспектів Іот. Бібліотеки протягом десятиліть використовують RFID-чіпи для підключення «аналогових речей» і обробки отриманих даних в цифровому вигляді [14]. Використання бездротових технологій, QR-кодів вже не перший рік також дозволяє встановлювати зв'язок між об'єктами реального світу і цифрового середовищем, робить можливим подальшу взаємодію з ними.

Проте вже зараз бібліотеки вдаються до використання власне технологій «Internet of Things». Так, з 2015 року бібліотека Університету Північної Кароліни в межах формату діяльності MakerspaceIoT запустила програму тестування і підтримки Іот-пристроїв, таких як Wi-Fi з підтримкою Arduinos і активно випробовує відкриту мережу для експериментів з технологіями Інтернету речей. У лабораторії бібліотеки проходять майстер-класи з освоєння платформ і безлічі цифрових об'єктів, інтелектуальних пристроїв, таких як автоматичні термостати, дверні замки, вбудовані датчики і т.д., здатних взаємодіючи з іншими пристроями, службами і сайтами збирати і надавати дані для подальших дій або досліджень. Студенти вчаться використовувати інструменти Іот і проводять експерименти в рамках власних проєктів, таких як розробка інноваційних продуктів (наприклад, смарт-годинник, смарт-замки), запис даних польових досліджень, «Розумний будинок» та ін. Програма доступна для всіх студентів, викладачів і співробітників [15].

Загалом, можливості застосування бібліотеками Іот-технології розглядається професійною спільнотою як досить реальна та перспективна. Наприкінці 2014 року OCLC провів коротке онлайн-опитування на предмет виявлення ступеня знайомства бібліотекарів і основних думок з приводу розвитку Internet of Things і пов'язаних з ними технологій [16]. Участь понад 100 бібліотекарів у дослідженні надала можливість визначити основні напрямки розвитку ІТ-технологій, що сприяють прогресу бібліотечної діяльності: управління запасами, мобільні платежі, купівля квитків, реєстрація подій, доступ та аутентифікація; мобільні посилання, управління приладами, навігація у фізичному просторі, розумні книги, ігри та технології доповнена реальність, об'єктно-орієнтоване навчання. Крім того, опитані визначили загальні проблемні моменти використання технологій Інтернету речей, зокрема, їх вразливість з точки зору захисту інформації, високу вартість обладнання та програмного забезпечення, необхідність підвищення кваліфікації та навчання бібліотечного персоналу для організації Іот-середовищ та обслуговування користувачів, і, головне, ризик зниження використання бібліотечних ресурсів. Серед основних ролей бібліотек з підтримки користувачів Іот-технологій.

Висновки. Головна мета всесвітньої павутини або мережі Інтернет націлена на отримання користувачами будь-якої інформації в будь-якому місці. Інтернет розвивався від текстових статичних сторінок (перша версія Web 1.0), коли користувачі лише читали навчальний контент, до навчального контенту, що ділиться через Інтернет (Web 2.0), який дозволяє учням взаємодіяти та маніпулювати матеріалом, і, нарешті, нова версія Web 3.0-технологій, що дозволяють об'єднувати та інтегрувати веб-контент для покращення роботи слухачів. Саме Web 3.0 – це технологія 3D, медіа-орієнтована, соціальна, інтелектуальна і семантична.

Впровадження Web 3.0 і його переваги для освіти скоро стане дійсністю: сприяння соціалізації, обміну інформацією та співпраці, комп'ютеризована комунікація. Семантична Web 3.0 мережа передбачає використання персональних помічників, інтелектуальних агентів, 3D Ігри, віртуальних світів, відкритих освітніх ресурсів і кращу систему управління знаннями. За допомогою інтелектуальних агентів і особистих помічників, люди зможуть організувати власне навчання, ставити свої цілі і приймати рішення, що стосуються змісту навчання. Семантична мережа, безсумнівно, буде позитивно впливати на осіб, які здобува-

ють вищу освіту, в цілому змінюючись відповідно до вимог і досягненнями в області інформаційно-комунікаційних технологій. В кінцевому підсумку моделі і стандарти стануть сумісними, а Мульти-

медіа мережа буде містити безліч інформації, яку шукають користувачі. Інтелектуальні агенти і особисті помічники будуть допомагати в сфері освіти і тільки тоді семантична мережа стане дійсністю.

Список літератури:

1. Umesha Naik comparative study of Web1.0, Web 2.0, Web 3.0. Conference: *6th International CALIBER At university of Allahabad*. – 2014. – https://www.researchgate.net/publication/26445599_Mobile_Agents_in_Wireless_LAN_and_Cellular_Data_Networks (дата звернення: 18.04.2024)
2. Rajiv and Manohar Lal Web 3.0 in education and research. *BIJTBVICAM's International Journal of Information Technology*. – 2011. – Vol. 3 – No. 2. – pp.335-340.
3. Ana-Maria Chlsega – Negrila Education in Web 3.0. *Jadlet Journal of Advanced Distributed Learning Technology*. – 2013. – No 1.- Vol.3 – pp. 50-58.
4. Що таке технологія Web 3.0 і як вона пов'язана з блокчейном та криптовалютами URL: <https://brokker.news/web3> (дата звернення: 18.04.2024)
5. Що таке Web3? URL: <https://forklog.com.ua/exclusive/shho-take-web3> (дата звернення: 18.04.2024)
6. Віртуальне 3D-середовище «Second Life», URL: <https://secondlife.com/> (дата звернення: 18.04.2024)
7. Copernicus: 3D Wikipedia. URL: https://www.researchgate.net/publication/220720572_Copernicus_3D_Wikipedia (дата звернення: 18.04.2024)
8. Інтелектуальна система пошуку та збирання інформації з тематичних веб-ресурсів. Думанський Н.О., Марковець О.В., 2009
9. Ситник В. Ф. С 41. Системи підтримки прийняття рішень: Навч. посіб. -К.: КНЕУ, 2009. – 614 с. ISBN 966-574-606-5.
10. Цифрова компетентність сучасного вчителя нової української школи: 2021: зб.матеріалів всеукр. наук.-практ.семінару (Київ, 2 березня 2021 р.) за заг.ред. О.В. Овчарук. Київ: Інститут інформаційних технологій і засобів навчання НАПН України: 2021. 116 с.
11. AutoPlay Menu Builder [Електронний ресурс]. Режим доступу URL: <http://www.linsoft.com/order.php>
12. Askey D. Heeding the signals: applying Web best practices when Google recommends D. Askey, K. Arlitsch. *Journal of Library Administration*. – 2015. – Т. 55. – No. 1. – С. 49-59.
13. Atzori L., Iera A., Morabito G. The internet of things: A survey. *Computer networks*. – 2010. – Т. 54. – No. 15.-С. 2787-2805.
14. Pera M. Libraries and the "Internet of Things": OCLC Symposium shows benefits, questions [Electronic Mode of access Resource]. <http://americanlibrariesmagazine.org/blogs/the-scoop/libraries-and-the-internet-of-things/>.
15. NCSU Libraries offers «<Internet of Things>> support with help from OIT [Electronic Resource]. – Mode of access: <https://oit.ncsu.edu/2015/11/24/ncsu-libraries-offers-internet-of-%20things-support-with-help-from-oit/>
16. Libraries and the Internet of Things [Electronic resource]. Mode of access : <https://www.oclc.org/publications/nextspace/articles/issue24/librariesandtheinternetofthings.en.html>

Patsora A.A. ANALYSIS OF PROSPECTIVE WAYS OF INVOLVING BLOCKCHAIN AND WEB 3.0 IN EDUCATIONAL PROCESSES

The article is dedicated to studying the advantages, prospects for application, and impact of Web 3.0 technologies on education. The author notes that the implementation of Web 3.0 will not only change people's perception but also their way of interacting on the Internet. This will be achieved through new functions and tools that go far beyond traditional social networks. Among such tools are personal assistants, intelligent agents, 3D games, virtual worlds, and open educational resources that will become accessible to users. Web 3.0 offers significantly broader possibilities than previous generations of the Internet, particularly through new ways of organizing data and integrating informational resources. Web 3.0 technologies have four key features that distinguish them from previous technological stages: intelligence, personalization, interoperability, and virtualization. Each of these characteristics plays an important role in shaping the future Web 3.0 ecosystem and has a significant impact on the educational sphere. The article applies methods of comprehensive theoretical analysis, as well as descriptive methods, to explore these aspects. Special emphasis is placed on those tools and services already used in educational activities and other areas today. For example, semantic digital libraries, virtual 3D libraries, semantic blogs, microblogging, virtual worlds and avatars, virtual educational laboratories, as well as intelligent search systems.

The scientific novelty of this work lies in the in-depth analysis of new Web 3.0 tools, which are gradually being integrated into various spheres of life, including education. The practical significance of the study focuses on examining the potential of using these tools to enhance the efficiency of educational activities. Attention is given to aspects that will make learning more interactive and personalized. The research results show that the semantic Web 3.0 network involves the active use of personal assistants, intelligent agents, virtual worlds, and open educational resources, contributing to improving knowledge management systems and ensuring greater accessibility of educational materials.

Special attention is given to intelligent agents and personal assistants, which help students organize their own learning. With the help of such tools, they will be able to set specific educational goals, monitor their achievement, and more effectively use time and resources for learning. This allows the learning process to become flexible, dynamic, and adaptive to the needs of each student, which is crucial in modern education.

Key words: *Web 3.0, educational process, adaptation, information technologies, learning models, semantic web, artificial intelligence, machine learning, 3D-Games, virtual world, semantic digital library, virtual 3D library, virtual educational laboratory, intelligent search.*

Повхан І.Ф.

ДВНЗ «Ужгородський національний університет»

Сароз В.Я.

ДВНЗ «Ужгородський національний університет»

Легеца А.В.

ДВНЗ «Ужгородський національний університет»

МОДИФІКОВАНИЙ МЕТОД ДЕРЕВА АЛГОРИТМІВ ДРУГОГО ТИПУ В ЗАДАЧАХ КЛАСИФІКАЦІЇ

В статті побудований ефективний метод синтезу дерев класифікації за фіксованою початковою інформацією для задачі розпізнавання геологічних даних. Побудоване алгоритмічне дерево класифікації другого типу буде безпомилково класифікувати всю навчальну вибірку, за якою побудована схема класифікації, мати високу інтерпретабельність, просту структуру та складатися з автономних алгоритмів класифікації, розпізнавання в якості вершин граф-схеми. Розроблений метод побудови дерев алгоритмів дозволяє працювати з навчальними вибірками великого об'єму різномісної інформації дискретного типу, забезпечує високу точність схеми, раціонально використовує апаратні ресурси системи в процесі генерації кінцевої схеми класифікації, дозволяє будувати моделі з наперед заданою точністю. В роботі пропонується модульна схема побудови класифікаторів у вигляді структур дерев класифікації, дерев алгоритмів, яка дозволяє обійти обмеження традиційних методів дерев рішень. Модифікований метод дерева алгоритмів другого типу дозволяє значно зменшити обчислювальну складність моделі класифікації в порівнянні з деревами алгоритмів інших структур та забезпечити необхідну, регульовану точність фінального класифікатора. Пропонується підхід синтезу нових алгоритмів розпізнавання на основі бібліотеки вже відомих алгоритмів та методів теорії розпізнавання. Такий підхід до синтезу моделей класифікації дозволить комплексно будувати нові класифікатори, моделі класифікації на основі модульного принципу. На базі запропонованого метода дерева алгоритмів другого типу побудований набір моделей, які забезпечили ефективну класифікацію масиву геологічних даних. Концепція дерев алгоритмів різних типів дозволяє ефективно працювати в задачах класифікації з даними довільних шкал, де інформація задається в звичній для нас природній формі. Побудовані моделі дерев класифікації забезпечили відсутність помилок на даних навчальної та тестової вибірки, підтвердили працездатність підходу дерев алгоритмів другого типу.

Ключові слова: дерево класифікації, алгоритмічне дерево, дискретний об'єкт, алгоритм розпізнавання, ознака.

Постановка проблеми. Класифікація і розпізнавання дискретних об'єктів представляють собою центральні проблеми в сфері штучного інтелекту. Дані задачі відрізняються великою різноманітністю, різним ступенем структурної складності і значною застосовністю в багатьох секторах економічної і соціальної діяльності людини. У таких дисциплінах, як геологія, де проблеми класифікації вирішуються за допомогою складних інформаційних систем, важливість та інтенсивність досліджень у цій галузі добре задокументовані [1–10]. Ці задачі класифікації вимагають розробки та декомпозиції математичних моделей, адаптованих до конкретних досліджуваних систем. В даний час в області штучного

інтелекту відсутній універсальний прикладний підхід, здатний вирішити весь спектр цих складних проблем. Однак з'явилося кілька широко застосовуваних теорій та методологій, серед яких нейронні мережі займають особливе місце завдяки своїй універсальності у вирішенні широкого спектру задач класифікації [11–14]. У практичних сценаріях спеціально налаштовані штучні нейронні мережі часто перевершують традиційні алгоритми та усталені моделі дерев рішень, такі як методи градієнтного бусту, особливо в задачах, пов'язаних з неструктурованими даними, дискретними наборами зображень або текстовим вмістом. І навпаки, при роботі зі структурованими наборами даних, що містять великі обсяги

масивних дискретних даних, які демонструють різні функціональні простори, методи та алгоритми, засновані на дереві рішень, демонструють чіткі переваги [15]. Як правило, деревоподібні моделі класифікації полегшують ефективну обробку даних різного масштабу, представляючи вхідну інформацію в притаманному їй вигляді. Численні сучасні стратегії і концепції спрямовані на розробку систем розпізнавання (СР) і класифікацій з використанням логічних/алгоритмічних моделей деревовидних класифікацій (структур ЛДК/АДК). Зростаючий інтерес до деревоподібних граф-схемних представлень класифікаторів обумовлений їх численними корисними властивостями [16]. Однією з перспективних областей застосування деревоподібної моделі класифікації, особливо в області алгоритмічних дерев, є класифікація геологічної інформації [22].

Аналіз останніх досліджень і публікацій.

Дана робота зосереджується на теорії дерев рішень фіксованого типу з акцентом на дерева алгоритмів та класифікацію дискретних об'єктів [14, 23, 25]. Зафіксуємо, що дослідження [20] наголошує на тому, що правила класифікації та схеми прийняття рішень, отримані з будь-якого методу або алгоритму розгалуженого вибору ознак, мають деревоподібну логічну структуру. Типовий класифікатор дерева прийняття рішень містить організовану послідовність вузлів, ознак та атрибутів, структурованих за шарами або рівнями, кожен з яких встановлюється на певному етапі синтезу дерева класифікації [15].

Суттєвою проблемою, виявленою в роботі [18], є ефективна побудова деревоподібних структур розпізнавання, які можуть приймати форму графів алгоритмів (АДК-структур). Отже, методологія дерева рішень полегшує створення ефективних класифікаторів, заснованих на модульному принципі, використовуючи добре відомі алгоритми розпізнавання [19–21]. Дослідження [14] аналізує фундаментальні питання, пов'язані з побудовою деревоподібних структур дерев рішень у випадку коли ознаки є малоінформативними, включаючи їх набори та комбінації. У галузі аналізу даних інваріантна здатність структур ЛДК/АДК виконувати одновимірне розгалуження дозволяє аналізувати вплив, важливість та якість окремих змінних. Ця здатність необхідна для управління різними типами змінних як наборами предикатів. Постійною проблемою, пов'язаною з методами та структурами дерева рішень, є оцінка якості та ефективності вершин (узагальнених ознак), які служать автономними алгоритмами класифікації

[15]. Методи логічних дерев класифікації широко використовуються в аналізі даних з метою синтезу ефективних моделей, які передбачають значення цільової змінної на основі вихідного набору даних, відформатований як структурована навчальна вибірка [19]. З прикладної точки зору, для задач класифікації використовуються численні методи та алгоритми, засновані на концепції дерева рішень – однак особливою популярністю користуються C4.5/C5.0, CART. Методи C4.5/C5.0 використовують теоретико-інформаційний критерій для вибору вузла або вершини, тоді як алгоритм CART спирається на індекс Джині, який оцінює відносні відстані між розподілами класів у межах метрики навчального набору [20, 21]. Набір методів та алгоритмів для вибору розгалужених ознак (структур АДК) базується на оптимальному наближенні початкового навчального набору з використанням ранжованого ряду алгоритмів класифікації [22]. Ключовою проблемою в методах ЛДК/АДК, як відзначено в [23], є вибір ефективного критерію розгалуження, тобто вибір вузлів, атрибутів та характеристик дискретних об'єктів для схем ЛДК та алгоритмів АДК. Ці основні питання детально розглядаються в роботі [24], яка розглядає якісну оцінку та інформативність окремих дискретних ознак, їх наборів та фіксованих комбінацій, що в кінцевому підсумку забезпечує ефективну реалізацію механізму розгалуження в логічній/алгоритмічній структурі дерева. Проблеми, пов'язані з конвергенцією процесу побудови дерева класифікації, включаючи вибір критеріїв зупинки для синтезу логічних та алгоритмічних дерев, залишаються значними [25]. Концепція дерев класифікації передбачає використання не тільки окремих атрибутів і ознак об'єктів, але і їх комбінацій і наборів в якості ознак, атрибутів і вузлів деревовидної структури розпізнавання. Використовуючи незалежні індивідуальні (автономні) алгоритми розпізнавання (оцінені за допомогою навчальних даних) замість атрибутів об'єктів як вершин, реалізується нова структура АДК [21–24]. Дане націлене на вивчення структур АДК фіксованого типу в практичній площині.

Постановка завдання. Метою даного дослідження є побудова ефективних моделей АДК геологічних даних (ситуаційного стану) на основі концепції модифікованих структур АДК другого типу.

Виклад основного матеріалу.

Модифікований метод АДК другого типу. Наступна базова граф-схема синтезу дерева алгоритмів другого типу на основі розгалуженого вибору

узагальнених ознак дозволяю будувати структури АСТ довільної складності та ефективності (рис. 1).

Етап початкового відбору та оцінки незалежних алгоритмів класифікації. На початковому етапі необхідно відібрати та оцінити базовий набір (фіксовану множину) алгоритмів класифікації та розпізнавання (a_1, a_2, \dots, a_m) з початкової бібліотеки алгоритмів. Зауважимо, що ця процедура виконується на основі вибраного (зафіксованого) критерію ефективності з подальшим ранжуванням – інтерактивним або випадковим чином. Критерій ефективності може мінятися в залежності від типу структури ЛДК яка будується і не може бути змінена в процесі синтезу дерева класифікації. Набір автономних алгоритмів (a_1, a_2, \dots, a_m) , а також їх загальна кількість у наборі вибираються залежно від прикладних аспектів задачі та може бути підібрана навіть на основі повного перебору бібліотеки алгоритмів (зрозуміло, що з значними втратами апаратних ресурсів та процесорного часу). На початковому етапі синтезу моделі ЛДК другого типу, шляхом вибору (ранжування) набору алгоритмів класифікації та їх загальною кількістю можна керувати кінцевою структурною складністю дерева алгоритмів.

Етап синтезу структури дерева алгоритмів та узагальнених ознак. На наступному етапі стоїть центральне завдання – побудова повного регулярного дерева класифікації (фіксованої структури ЛДК), де відповідні яруси структури містять відібрані алгоритми класифікації (a_1, a_2, \dots, a_m) , зафіксовані на першому етапі побудови наборів класифікаторів.

Особливістю дерева алгоритмів другого типу є те, що в побудованій структурі дерева класифікації (ЛДК структурі) кожна вершина має два переходи на наступний рівень, що позначаються значенням з двійкового набору $\{0,1\}$. Саме тому структура дерева алгоритмів представлена за допомогою регулярної ЛДК конструкції. Виходячи з цього, всі атрибути (мітки) одного типу (алгоритми класифікації та згенеровані узагальнені ознаки) розташовані на кожному з рівнів цієї структури. У такій регулярній структурі дерева класифікації – вузли є незалежними алгоритмами (класифікаторами) (a_1, a_2, \dots, a_m) . Набори узагальнених ознак (УО) f_j також генеруються на етапі синтезу структури дерева алгоритму. Отже можна зробити висновок що дерево алгоритмів породжує дерево узагальнених ознак.

Ідея другого етапу синтезу структури дерева алгоритмів (моделі АДК II типу) полягає в процедурі синтезу набору узагальнених ознак f_j (вер-

шин дерева узагальнених ознак) на основі попередньо обраних наборів незалежних алгоритмів класифікації та розпізнавання a_i . Значимо, що загальна кількість УО f_j , які генерує відповідний алгоритм класифікації, залежить від вихідних параметрів моделі АДК та параметрів синтезу, специфіки прикладної задачі та ресурсних обмежень системи синтезу дерева класифікації.

В кінці другого етапу, після завершення формування набору синтезованих узагальнених ознак f_j для заданої прикладної задачі вони розташовуються у відповідних вузлах, ярусах дерева алгоритмів другого типу (будується структура дерева узагальнених ознак).

Центральним моментом даного етапу є вибір ефективних механізмів оптимального синтезу та розташування наборів УО в структурі моделі АДК. В залежності від типу АДК дана задача має багато варіантів розв'язку.

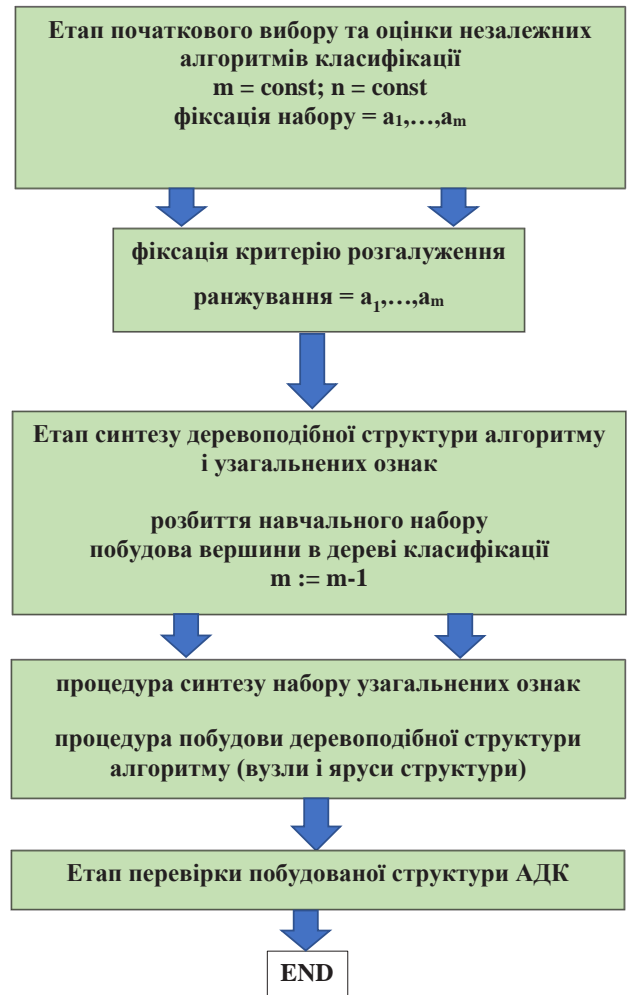


Рис. 1. Модифікований метод АДК другого типу

Етап фінальної оцінки ефективності побудованої структури АДК другого типу. На заключ-

ному етапі синтезу дерева алгоритмів другого типу необхідно перевірити побудовану модель АДК. Для кожного елемента (об'єкта) тестової вибірки обчислюються відповідні значення $\varphi(a_j)$. Обчислення цього значення здійснюється на основі набору раніше побудованих узагальнених ознак – для кожного вузла відповідного рівня дерева. Побудовані узагальнені ознаки визначають відповідний маршрут (обмежений класифікатор) в структурі дерева алгоритмів другого типу. Для такої структури кожен з вузлів дерева алгоритмів у разі можливої апроксимації об'єкта невідомої класифікації збільшує відповідний лічильник класу, що належить, і залишає його незмінним у разі помилки або збою класифікації. Дана процедура дозволяє провести остаточну оцінку ефективності побудованого дерева алгоритмів другого типу.

Експериментальна частина. Відмітимо, що запропонована схема побудови АДК дає змогу регулювати складність моделі дерева класифікації, що будується, будувати моделі з наперед заданою точністю, а сама структура дерева класифікації складається з різноманітних автономних алгоритмів класифікації як будівельних модулів (компонентів). Причому задача відбору моделі дерева класифікації серед набору побудованих АДК для конкретної задачі визначається набором параметрів, які мають визначальну важливість для поточної прикладної задачі (набору даних НВ).

Зрозуміло, що для порівняння та відбору конкретної моделі АДК з фіксованого набору, необхідно виділити найбільш важливі їх параметри (розмірність ознакового простору, кількість вершин, переходів, алгоритмів, тощо) та визначити їх похибку щодо масиву вхідних даних.

Принципово розглянути критерії якості отриманих інформаційних моделей, які залежать від похибки моделі, потужності початкового масиву даних НВ, об'єму тестової вибірки (кількості навчальних пар та розмірності ознакового простору задачі), кількості параметрів моделі тощо. Зрозуміло, що критично важливими параметрами побудованої моделі АДК, які необхідно мінімізувати, є помилки моделі відповідно на масивах даних навчальної та тестової вибірки та для кожного з класів, які задані початковою умовою поточної прикладної задачі.

Зауважимо, що принциповим моментом залишається питання зменшення складності структури АДК (йдеться про кількість ознак, алгоритмів у структурі АДК, загальну кількість вершин моделі АДК та загальну кількість переходів у структурі АДК), параметрів загальних

витрат пам'яті та процесорного часу інформаційної системи. Так, важливим показником якості побудованої моделі у вигляді дерева класифікації з урахуванням параметрів структури моделі ЛДК є загальний інтегральний показник якості в наступній формі:

$$Q_{Main} = \frac{Fr_{All}}{V_{All} \cdot \sum_i P_i} \cdot e^{-\frac{Er_{All}}{M_{All}}}. \quad (1)$$

Відмітимо, що в формулі (1) набір параметрів p_i представляє собою найбільш важливі характеристики побудованого дерева класифікації, що оцінюються:

1) Er_{All} – загальна кількість помилок моделі АДК на масивах даних початкових тестової та навчальної вибірки;

2) M_{All} – загальна потужність (об'єм) масивів даних навчальної та тестової вибірки;

3) Fr_{All} – кількість вершин отриманої моделі АДК із результативними значеннями f_r (функцій розпізнавання, тобто листів дерева класифікації);

4) V_{All} – представляє загальну кількість усіх типів вершин у структурі моделі АДК;

5) O_{Uz} – загальна кількість узагальнених ознак, що використовуються в моделі дерева класифікації;

6) P_{All} – загальна кількість переходів між вершинами в структурі побудованої моделі дерева класифікації;

7) N_{Alg} – загальна кількість різних автономних алгоритмів класифікації a_i , що використовуються в моделі дерева класифікації.

Відмітимо, що даний інтегральний показник якості моделі АДК буде приймати значення від нуля до одиниці. Чим меншим він буде, тим гіршою буде якість побудованого дерева класифікації, а чим більшим буде показник, тим кращою буде отримана модель.

На основі методів дерев класифікації, в Ужгородському національному університеті був розроблений програмний комплекс «Оріон» для генерації автономних систем розпізнавання. Алгоритмічна бібліотека системи нараховує 18 алгоритмів розпізнавання серед яких реалізовані схеми дерев алгоритмів трьох типів.

Базовою задачею на якій перевірялася ефективність методів дерев алгоритмів була задача розпізнавання геологічних даних – задача про розділення нафтоносних та водоносних пластів. Початкові параметри даної прикладної задачі класифікації геологічних даних представлені в (табл. 1).

В НВ представлена інформація про об'єкти двох класів. На етапі екзамени побудована система класифікації має забезпечити ефективне роз-

пізнання об'єктів невідомої класифікації відносно цих двох класів. Перед початком роботи навчальна вибірка була автоматично перевірена на коректність – пошук та видалення помилок першого роду. Відмітимо, що в системі реалізована схема донавчання та виправлення помилок в дереві класифікації (алгоритм ДВП).

Навчаюча вибірка представленої задачі складалася з 1342 об'єктів, з них нафтоносні – 761 об'єкти. Ефективність сконструйованої моделі АДК оцінювалася на тестовій виборці об'єму 267 об'єктів. Дані навчаючих та тестових вибірок отримані на основі геологічної розвідки на території Закарпатської області в період з 2001 року по 2018 рік. Фрагмент основних результатів, приведених вище експериментів, побудованих моделей ЛДК/АДК різних типів представлений в (табл. 2).

В (Табл. 3) представлена інформація щодо часу генерації представлених моделей класифікації, загальної кількості вершин, елементарних та уза-

гальнених ознак на базовій апаратній конфігурації Intel i7-12700H. Всі побудовані схеми дерев класифікації (структур ЛДК/АДК) забезпечили необхідний рівень точності заданий умовою задачі, швидкодію та витрати робочої пам'яті системи.

Отже запропонований в роботі метод алгоритмічного дерева класифікації (методи АДК другого типу) порівнювалися з методом повного ЛДК та обмеженого методу селекції елементарних ознак та показав у цілому прийнятний результат.

Висновки. Побудовані моделі дерев класифікації (структури АДК/ЛДК) забезпечили необхідні якість та швидкість схем класифікації геологічних даних при достатньо компактній структурі самої конструкції дерева (параметр S_{main}). Набори незалежних алгоритмів класифікації, які були відібрані для генерації груп УО, також підтвердили свою ефективність в межах даної прикладної задачі. Найбільш якісною, з точки зору інтегральної оцінки, виявились саме моделі АДК різних

Таблиця 1

Початкові параметри задачі класифікації

Опис класів H_i задачі	Розмірність ознакового простору N	Загальна потужність початкової $NB - M$	Загальна кількість класів в $NB - l$	Співвідношення об'єктів різних класів в $NB - H_i/M$
Нафтоносні пласти (H_1)	(12/10)	1342	2	761/1342
Водоносні пласти (H_2)	(12/10)	1342	2	581/1342

Таблиця 2

Порівняльна таблиця побудованих моделей АДК/ЛДК для класифікації геологічних даних

№ моделі дерева класифікації	Метод синтезу структури дерева класифікації	Інтегральний показник якості моделі АДК Q_{Main}	Загальний показник структурної складності моделі дерева класифікації S_{Main}	Кількість помилок та відмов класифікації моделі ЛДК/АДК на масиві даних $E_{r_{All}}$
N1	Метод повного ЛДК на основі селекції елементарних ознак (розгалужений вибір ознак)	0,004786	121	7
N2	Метод ЛДК з одноразовою оцінкою важливості ознак	0,002271	144	12
N3	Обмежений метод побудови ЛДК	0,003193	97	16
N4	АДК (type I)	0,005287	52	10
N5	АДК (type II)	0,003033	64	8
N6	Обмежений метод побудови АДК	0,002654	55	14
N7	Дерево алгоритмів на основі гіперкуль	0,007221	31	6
N8	Дерево алгоритмів на основі гіперпаралелепіпедів	0,004418	54	19
N9	Дерево алгоритмів на основі гіпереліпсів	0,006476	30	8
N10	Дерево алгоритмів на основі гіперкубів	0,006251	37	11

Загальні структурні параметри побудованих моделей ЛДК/АДК

	N1	N2	N3	N4	N5	N6	N7	N8	N9	N10
Загальний час синтезу дерева класифікації T_{All}	34 (с.)	21 (с.)	18 (с.)	65 (с.)	82 (с.)	55 (с.)	47 (с.)	56 (с.)	50 (с.)	98 (с.)
Кількість ярусів структури ЛДК/АДК R_{All}	12	10	9	26	30	23	21	24	22	34
Загальна кількість атрибутів / вершин структури ЛДК/АДК V_{All}	102	91	86	234	244	212	198	223	207	219
Загальна кількість елементарних / узагальнених ознак в структурі дерева класифікації O_{el}/O_{uz}	56 (ел.)	72 (ел.)	40 (ел.)	17 (уз.)	41 (уз.)	30 (уз.)	18 (уз.)	47 (уз.)	21 (уз.)	35 (уз.)

типів на основі базових геометричних класифікаторів. Причому синтезовані структури АДК видавали відносно невелику кількість помилок класифікації на даних навчальних та тестових вибірок. Модель повного АДК другого типу на основі геометричних класифікаторів показала близький результат ($Q_{main}=0,003033$) за рахунок наявності в схемі універсального алгоритму гіперсфер. Відмітимо, що структура АДК першого типу – то вона показала кращу якість ($Q_{main}=0,005287$) в порівнянні зі структурами дерев алгоритмів другого типу. Це пояснюється більш складною конструкцією моделі ($S_{main}=52$), як результат більшим часом генерації. Також треба зважати на особливості відібраних геометричних, які не завжди дозволяють проводити ефективну апроксимацію даних НВ. Недоліком представлених моделей АДК, який виявився в умовах даної задачі, є відносно великі часові затрати на етап синтезу самих моделей дерев класифікації в порівнянні зі структурами ЛДК. Різниця в порівнянні зі структурою ЛДК на основі розгалуженого вибору ознак з покроковою

оцінкою інформативності для моделей АДК першого типу склала майже 34 %.

Практична цінність отриманих результатів полягає в тому, що запропонований метод побудови моделей АДК (другого типу) дає можливість будувати економні та ефективні моделі класифікації заданої точності (даний метод був реалізований у бібліотеці алгоритмів системи “ОРІОН” для розв’язку різноманітних прикладних задач класифікації), які характеризуються великим ступенем універсальності відносно широкого кола прикладних задач. Відмітимо, що практичні застосування підтвердили працездатність побудованих моделей дерев класифікації та розробленого програмного забезпечення. В якості перспективи, майбутні дослідження можуть бути спрямовані в бік подальшого розвитку методів АДК (введення нових типів, схем дерев класифікації), оптимізації програмних реалізацій запропонованого методу АДК, а також його практичної апробації на множині реальних задач класифікації та розпізнавання.

Список літератури:

1. T. Hastie, R. Tibshirani, J. Friedman, *The Elements of Statistical Learning*, Berlin, Springer, 2008.
2. J.R. Quinlan, *Induction of Decision Trees*, *Machine Learning*, (1986) 81-10.
3. L.L. Breiman, J.H. Friedman, R.A. Olshen, C.J. Stone, *Classification and regression trees*, Boca Raton, Chapman and Hall/CRC, 1984.
4. M. Lupei, A. Mitsa, V. Repariuk, V. Sharkan, *Identification of authorship of Ukrainian-language texts of journalistic style using neural networks*, *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies* 1 (2 (103)) (2020) 30-36. doi: 10.15587/1729-4061.2020.195041.
5. Y.V. Bodyanskiy, A.Y. Shafronenko, I.P. Pliss, *Credibilistic fuzzy clustering based on evolutionary method of crazy cats*, *System Research and Information Technologies*, 3/21 (2021) 110-119.

6. M. Miyakawa, *Criteria for selecting a variable in the construction of efficient decision trees*, IEEE Transactions on Computers 38(1) (1989) 130-141.
7. H. Koskimaki, I. Juutilainen, P. Laurinen, J. Roning, *Two-level clustering approach to training data instance selection: a case study for the steel industry*, in: Proceedings of the International Joint Conference on Neural Networks, IJCNN 2008, part of the IEEE World Congress on Computational Intelligence, IEEE, Los Alamitos. (2008) 3044-3049. doi: 10.1109/ijcnn.2008.4634228.
8. S.F. Jaman, M. Anshari, *Facebook as marketing tools for organizations: Knowledge management analysis*, in: Dynamic perspectives on globalization and sustainable business in Asia, IGI Global, Hershey. (2019) 92-105. doi: 10.4018/978-1-5225-7095-0.ch007.
9. V.E. Strilets, S.I. Shmatkov, M.L. Ugryumov et al, *Methods of machine learning in the problems of system analysis and decision making: monograph*. Karazin Kharkiv National University, (2020) 195.
10. R.L. De Mántaras, *A distance-based attribute selection measure for decision tree induction*, Machine learning 6(1) (1991) 81-92.
11. K. Karimi, H. Hamilton, *Generation and Interpretation of Temporal Decision Rules*, International Journal of Computer Information Systems and Industrial Management Applications 3 (2011) 314-323.
12. B. Kamiński, M. Jakubczyk, P. Szufel, *A framework for sensitivity analysis of decision trees*, Central European Journal of Operations Research 26 (1) (2017) 135-159.
13. H. Deng, G. Runger, E. Tuv, *Bias of importance measures for multi-valued attributes and solutions*, in: Proceedings of the 21st International Conference on Artificial Neural Networks, volume 2 of ICANN 2011, Springer-Verlag, Berlin. (2011) 293-300. doi: 0.1007/978-3-642-21738-8_38.
14. S.A. Subbotin, *Construction of decision trees for the case of low-information features*, Radio Electronics, Computer Science, Control 1 (2019) 121-130.
15. A. Shyshatskyi, *Complex Methods of Processing Different Data in Intellectual Systems for Decision Support System*. International Journal of Advanced Trends in Computer Science and Engineering, 9(4) (2020) 5583-5590. doi: <https://doi.org/10.30534/ijatcse/2020/206942020>
16. A. Painsky, S. Rosset, *Cross-validated variable selection in tree-based methods improves predictive performance*, IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence 39(11) (2017) 2142-2153. doi:10.1109/tpami.2016.2636831.
17. D. Imamovic, E. Babovic, N. Bijedic, *Prediction of mortality in patients with cardiovascular disease using data mining methods*, in: Proceedings of the 19th International Symposium INFOTEH-JAHORINA, INFOTEH 2020, IEEE, Los Alamitos. (2020) 1-4.
18. S.B. Kotsiantis, *Supervised Machine Learning: A Review of Classification Techniques*, Informatica 31 (2007) 249-268.
19. Y.I. Zhuravlev, V.V. Nikiforov, *Recognition algorithms based on the calculation of estimates*, Cybernetics 3 (1971) 1-11.
20. I. Povkhan, O. Mules, O. Melnik, Y. Bilak, V. Polishcuk, *The Problem of Convergence of Classifiers Construction Procedure in the Schemes of Logical and Algorithmic Classification Trees*, CEUR Workshop Proceedings, Proceedings of the Second International Workshop on Computer Modeling and Intelligent Systems (CMIS-2022), 3137 (2022) 1-13.
21. I. Povkhan, *A constrained method of constructing the logic classification trees on the basis of elementary attribute selection*, CEUR Workshop Proceedings, Proceedings of the Second International Workshop on Computer Modeling and Intelligent Systems (CMIS-2020), 2608 (2020) 843-857.
22. Y.A. Vasilenko, E.Y. Vasilenko, I.F. Povkhan, *Conceptual basis of image recognition systems based on the branched feature selection method*, European Journal of Enterprise Technologies 7(1) (2004) 13-15.
23. I. Povkhan, M. Lupei, *The algorithmic classification trees*, in: Proceedings of the IEEE Third International Conference on Data Stream Mining & Processing, DSMP 2020, IEEE, Los Alamitos, (2020) 37-44.
24. I. Povkhan, M. Lupei, M. Kliap, V. Laver, *The issue of efficient generation of generalized features in algorithmic classification tree methods*, in: Proceedings of the International Conference on Data Stream Mining and Processing, DSMP 2020, Springer, Cham. (2020) 98-113.
25. I. Povkhan, *Classification models of flood-related events based on algorithmic trees*, Eastern-European Journal of Enterprise Technologies 6(4) (2020) 58-68. doi: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2020.219525>.
26. J. Rabcan, V. Levashenko, E. Zaitseva, M. Kvassay, S. Subbotin, *Application of Fuzzy Decision Tree for Signal Classification*, IEEE Transactions on Industrial Informatics 15(10) (2019) 5425-5434. doi: 10.1109/tii.2019.2904845.
27. P.E. Utgoff, *Incremental induction of decision trees*, Machine learning 4(2) (1989) 161-186. doi:10.1023/A:1022699900025.
28. L. Hyafil, R.L. Rivest, *Constructing optimal binary decision trees is NP-complete*, Information Processing Letters 5(1) (1976) 15-17.

29. H. Wang, M. Hong, *Online ad effectiveness evaluation with a two-stage method using a Gaussian filter and decision tree approach*, *Electronic Commerce Research and Applications* 1(35) (2019) Article 100852. doi: 10.1016/j.elerap.2019.100852.
30. I.L. Kaftannikov, A.V. Parasich, *Decision Tree's Features of Application in Classification Problems*, *Bulletin of the South Ural State University, Ser. Computer Technologies, Automatic Control, Radio Electronics* 15(3) (2015) 26-32. doi: 10.14529/ctcr150304.
31. I.F. Povhan, *Logical recognition tree construction on the basis a step-to-step elementary attribute selection*, *Radio Electronics, Computer Science, Control*. 2 (2020) 95-106.
32. S.L. Lin, H.W. Huang, *Improving Deep Learning for Forecasting Accuracy in Financial Data*, *Discrete Dynamics in Nature and Society* Volume 2020 (2020) Article ID 5803407. doi: 10.1155/2020/5803407.
33. E. Fincham, D. Gasevic, J. Jovanovic, A. Pardo, *From Study Tactics to Learning Strategies: An Analytical Method for Extracting Interpretable Representations*. *IEEE Transactions on Learning Technologies*, 12(1) (2020) 59–72. doi: <https://doi.org/10.1109/tlt.2018.2823317>
34. Ameisen E, *Building Machine Learning Powered Applications: Going from Idea to Product*, O'Reilly Media, California. (2020).
35. M. Sewak, *Deep Reinforcement Learning, Frontiers of Artificial Intelligence*, Springer, Berlin, 2020. doi: 10.1007/978-981-13-8285-7.
36. A. Kintonova, M. Mussaif, G. Gabdreshov, *Improvement of iris recognition technology for biometric identification of a person*, *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 6(2-120) (2023) 60-69.

Povkhan I.F., Saroz V.Ia., Leheza A.V. A MODIFIED METHOD OF THE SECOND-TYPE ALGORITHM TREE IN CLASSIFICATION TASKS

The article presents an effective method for synthesizing classification trees based on fixed initial information for the problem of recognizing geological data. The constructed algorithmic classification Tree of the second type will accurately classify the entire training sample, according to which the classification scheme is built, have high interpretability, simple structure and consist of autonomous classification algorithms, recognition as vertices of the graph scheme. The developed method of constructing algorithm trees allows you to work with training samples of a large volume of different types of discrete information, provides high accuracy of the scheme, efficiently uses the hardware resources of the system in the process of generating a final classification scheme, and allows you to build models with a pre-set accuracy. The paper offers a modular scheme for constructing classifiers in the form of classification tree structures and algorithm trees, which allows you to bypass the limitations of traditional decision tree methods. The modified method of the algorithm Tree of the second type can significantly reduce the computational complexity of the classification model in comparison with the algorithm trees of other structures and provide the necessary, configurable accuracy of the final classifier. An approach to synthesizing new recognition algorithms based on a library of already known algorithms and methods of recognition theory is proposed. This approach to the synthesis of classification models will allow us to comprehensively build new classifiers, classification models based on the modular principle. Based on the proposed method of the second type of algorithm tree, a set of models was built that provided an effective classification of the geological data array. The concept of algorithm trees of various types allows us to work effectively in classification problems with data from arbitrary scales, where information is set in the usual natural form for us. The constructed models of classification trees ensured that there were no errors on the data of the training and test sample, and confirmed the operability of the approach of trees of algorithms of the second type.

Key words: classification tree, algorithmic tree, discrete object, recognition algorithm, attribute.

Прокоф'єв І.Г.

Хмельницький національний університет

Савенко О.С.

Хмельницький національний університет

Медзатий Д.М.

Хмельницький національний університет

МЕТОД СТАТИСТИЧНОГО АНАЛІЗУ ПРОГРАМНОГО КОДУ ВИКОРИСТОВУЮЧИ КОМПЛЕКСНІ ПАРАМЕТРИ

Програмне забезпечення поширилося на всі сфери людської діяльності – економіка, наука та бізнес не можуть працювати без програмного забезпечення, а мільйони людей залучені до його написання та підтримки, а це створює безпрецедентний вплив на виклики безпеки. Неважливо, чи це військова сфера, чи роздрібна торгівля, але сьогодні жодна галузь не обходиться без якісного програмного забезпечення, і навіть невеликий збій у розподіленій системі з великою кількістю користувачів може спричинити збій у інших дочірніх галузях. Можна сказати, що з 1990 року кількість програмного забезпечення надзвичайно значно зросла, оскільки цей період ознаменувався широким розвитком комп'ютерних технологій і поширенням комп'ютерів та Інтернету. Протягом цього періоду було написано та випущено багато програмного забезпечення в різних областях, таких як операційні системи, бізнес-програми, ігри, веб-програми, мобільні програми та багато іншого. Крім того, багато програмного забезпечення регулярно оновлюється і розширюється, тому створення нових версій і підтримка існуючих програм триває і сьогодні. Більше того, програмне забезпечення фактично стало звичайним товаром, коли окремі компанії продають рішення API (Application Programming Interface), SaaS (Software as a Service), і це не відрізняється від звичайних ресурсів у сфері енергосервісу чи товарообігу супермаркетів згідно з підходу «Плати – отримуй». У зв'язку з високим навантаженням у популярних програмних рішеннях використовуються нові архітектурні підходи до написання програмного забезпечення, що значно підвищує складність написання підтримки такого програмного забезпечення. І якщо раніше тільки технічні гіганти, такі як Google і Apple, дійсно потребували унікальних алгоритмів для створення високонавантаженого програмного забезпечення, то в 2024 році тренд мікросервісної архітектури вимагає міцних знань побудови розподілених систем. Все це накладає суттєві обмеження на новостворене програмне забезпечення – якість програмного забезпечення має бути вимірюваною величиною і ця цінність має бути принаймні контрольованою як розробниками, так і керівництвом. Якісне програмне забезпечення можливе лише за наявності якісного коду, який ми розглянемо далі. Сучасні програмні системи можуть мати велику складність, тому дуже важливо підтримувати існуючі системи та вимірювати якість. У цій статті розглянуто різні методи оцінювання якості та безпеки коду в сучасних програмних системах. Було проаналізовано різні відомі показники якості коду та те, як їх можна застосувати в залежності від мови програмування. Метою статті є огляд існуючих показників якості програмного коду та запропоновано нову стратегію аналізу якості програмного коду. Дослідницька робота зосереджена на пошуку нових методів, заснованих на машинному навчанні, які дозволяють знаходити різні анти-патерни та codesmell по-новому. Результатом методу є виявлення загальної якості конкретного програмного забезпечення, написаного C++ подібною мовою програмування як C# чи Java

Ключові слова: якість програмного коду, статичний аналіз коду, показники якості коду.

Постановка проблеми. На сьогодні достеменно не відомо яка кількість програмного забезпечення (ПЗ) створюється в рік, але можна чітко передбачити, що цей процес не знизиться в найближчі роки, особливо після буму AI технологій у 2020-х роках. Якщо на початку 90-х років

минулого століття програмний код в основному писався співробітниками військових інституцій та ентузіастами (Лінукс на Netscape Navigator), то на сьогодні у написання коду залучені також технічні гіганти, які створюють та розповсюджують власні фреймворки (Android та Angular від Google,

React від Фейсбук, .NET від Microsoft). Фреймворки та бібліотеки значно спрощують роботу пересічним програмістам та бізнесу і дозволяють сфокусуватись на вирішенню конкретних проблем без витрачання часу на інфраструктурні речі і наслідком є створення складних розподілених системи реального часу з мільйонами користувачів. В цьому контексті якість коду є не побічною проблемою а мейнстрімом, оскільки втрати якості ПЗ може відбутися внаслідок досить не суттєвих змін у кодї що може призвести до повної зупинки критичних сервісів роботи.

«Якість коду» [1] означає загальну якість вихідного коду програмного продукту. Це значення показує, наскільки добре код написаний, організований і підтримується. Якість коду забезпечується кількома принципами: читабельність, масштабованість, продуктивність, безпека, тестування та налагодження. Читабельність [2] означає, що високоякісний код легко читати та розуміти. Це полегшує розробникам співпрацю та підтримку коду з часом. Ремонтпридатність – це коли код, який добре організований і відповідає найкращим практикам, легше підтримувати. Це дозволяє ефективно виправляти помилки, оновлювати та додавати нові функції без появи нових помилок. Масштабованість – це коли якість коду часто пов'язана з тим, наскільки добре програма може масштабуватися. Поганий код може не впоратися зі збільшенням навантаження або зміною вимог. Продуктивність означає, що добре написаний код може бути ефективнішим і мати кращу продуктивність. Це також може зменшити споживання ресурсів, зробивши програмне забезпечення більш чутливим і менш ресурсоємним. Безпека коду тісно пов'язана з безпекою. Поганий код може створювати вразливості, якими можуть скористатися зловмисники. Хороші практики якості коду можуть допомогти зменшити ризики безпеки. Тестування та налагодження відносяться до випадку, коли високоякісний код легше перевірити та налагодити. Це зменшує час і зусилля, необхідні для виявлення та усунення проблем.

Отже, процес визначення якості коду не є тривіальною роботою. І головна проблема полягає в тому, щоб знайти список або правила, які можуть визначити, де конкретний код потребує критичних змін, а де ні. Мета полягає не лише у визначенні деяких правил, які можна легко знайти в Google, а й у пошуку найефективніших способів визначення поганого/проблемного коду програмного забезпечення. Недостатньо просто знайти цикломатичну складність або обчислити кількість ряд-

ків коду. Також, сюди відноситься й виявлення code-smell та анти-патернів.

Метод визначення якості програмного забезпечення здійснюється в кілька етапів: компіляція → статичний аналіз [3] → покриття тестами [4] → динамічний аналіз → збір даних ітерації AAA та оцінка -> ... зміна коду. База коду не є статичною величиною, її можуть щодня змінювати десятки розробників, особливо якщо використовується ПЗ, яким користуються мільйони людей, наприклад Gmail, Microsoft Office 365, X (раніше Twitter), Netflix. Іншими словами, процес визначення якості коду є перманентним, і кожні нові зміни коду ініціюють нову ітерацію, починаючи з компіляції. Метрики або атрибути якості програмного забезпечення зазвичай відповідають наступним показникам якості коду: цикломатична складність, кількість рядків коду (LOC), покриття коду, дублювання коду, порушення статичного аналізу коду, індекс ремонтпридатності, відтік коду, технічний борг. Розглянемо їх.

Цикломатична складність [5] вимірює складність програми шляхом підрахунку кількості лінійно незалежних шляхів у вихідному кодї програми. Висока цикломатична складність може вказувати на складний код, який важко підтримувати. Кількість рядків коду (LOC) [6] це проста, але базова метрика, яка вимірює розмір кодової бази шляхом підрахунку кількості рядків у файлі вихідного коду. Хоча це не є прямим показником якості, занадто довгі методи або класи можуть вказувати на погану організацію коду. Покриття коду вимірює відсоток коду, який виконується автоматичними тестами. Більше охоплення коду зазвичай вказує на більш повну перевірку бази коду. Дублювання коду вимірює кількість дубльованого коду в базі коду. Дубльований код може призвести до проблем із підтримкою та невідповідностей. Порушення статичного аналізу коду вимірює кількість порушень стандартів кодування або найкращих практик, виявлених інструментами статичного аналізу коду. Поширені проблеми включають невикористані змінні, неправильну обробку помилок і порушення правил кодування. Індекс ремонтпридатності – це загальний показник, який поєднує різні атрибути коду, такі як складність, дублювання коду та зміни коду, щоб оцінити загальну ремонтпридатність бази коду. Відтік коду – вимірює частоту змін коду з часом. Значна зміна коду може свідчити про нестабільність або часті рефакторинги, що може вплинути на якість програмного забезпечення. Технічний борг означає зусилля, необхідні для вирішення неоптимальних варіантів дизайну або реа-

лізації в базі коду. Високий технічний борг може уповільнити швидкість розробки та збільшити ймовірність помилок. Управління залежностями вимірює складність і стабільність залежностей у базі коду. Надлишкові залежності або застарілі бібліотеки можуть створювати вразливості та додаткові витрати на обслуговування. Показники перевірки коду пов'язані з процесами кодування, такими як час виконання перевірки, участь рецензента та кількість проблем, виявлених під час перевірки. Розрахунок цикломатичної складності в C++ і об'єктно-орієнтованих мовах програмування (ООП) передбачає аналіз потоку керування кодом, який може включати як процедурні, так і об'єктно-орієнтовані конструкції. В ООП, таких як C++, також потрібно враховувати додаткові фактори – методи класу та зв'язки класу. Методи класу в межах класу можуть містити логічні оператори, такі як оператори if або цикли, які сприяють загальній цикломатичній складності класу. Якщо використовуються успадкування та поліморфізм, потік керування може стати більш складним через перевизначення методу та динамічну диспетчеризацію. Кожен перевизначений метод додає пункти прийняття рішення до складності. Якщо код передбачає взаємодію між класами, наприклад виклики методів або співпрацю, ці взаємодії також необхідно враховувати при обчисленні цикломатичної складності.

Інколи до якості ПЗ також включають атрибути пов'язані з безпекою. На сьогодні найбільш поширеним типом аплікацій є інтернет сайти за рахунок відносної простоти створення – системи керування контенту та фреймворки дають про себе знати. І при застосуванні навіть досить простої розподіленої [7, 8] бот атаки більшість простих сайтів просто зупиняться і не буде працювати. І якщо раніше в 2000-х роках DDOS атаки можна було припинити шляхом встановленням додаткового мережевого обладнання, то з появою botnets для забезпечення функціонування сайту роль якості ПЗ є однією з перших і мова не про прості sql ін'єкції та відомі OWASP правила, а перш за все з продуманню правильної архітектури.

До безпекових викликів також належать і мобільні застосунки ріст яких припав на 2010-і роки в зв'язку з поширенням iOS/Android [9] ОС коли зловмисник може спробувати поціпити дані на фізичному пристрої. Ізраїльська розвідка давно використовує ПЗ що зламує приватні дані на будь-якому пристрої, але з встановленою ОС більш ранніх поколінь. Досить поширеним також є злом застосунків Інтернету Речей IoT [10].

Після розгляду усіх існуючих атрибутів якості ПЗ виявилось що метрика Кемерера є досить суттєвою. Сама метрика була запропонована Реймондом Кемерером для оцінки складності та тестування програмних систем, особливо об'єктно-орієнтованих. Він враховує кількість класів програми, кількість інтерфейсів і залежностей між класами. Метрика Кемерера базується на метриках залишкових з'єднань і стабільності пакетів в архітектурі програми.

Обидва ці показники можуть бути корисними для оцінки складності програмного коду та архітектури програмних систем. Вони допомагають визначити потенційні проблеми та області для вдосконалення програм і надають огляд рівня складності програми.

Показники успадкування – це показники, які використовуються для вимірювання характеристик успадкування в об'єктно-орієнтованих програмах. Спадкування в ООП визначає, як класи можуть успадковувати властивості та методи від інших класів.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Перш, ніж визначати власні/спеціальні методи та алгоритми, розглянемо існуючі методи виявлення атрибутів якості коду та роботу, виконану в цій області. Є кілька популярних комерційних програмних інструментів, таких як SonarQube [11], DeepSource або Embold, але їхні алгоритми недоступні, навіть якщо вони засновані на атрибуті Cyclomatic Complexity і Code Coverage.

Більшість дослідницьких статей зосереджено на конкретних атрибутах якості коду, але вони не шукають залежності між атрибутами або не акцентують на цьому достатньої уваги.

Автор [11] описав емпіричну перевірку об'єктно-орієнтованих показників дерева глибини успадкування (DIT) і кількості нащадків (NOC), запропонованих Чідамбером і Кемерером.

Показано, що різні інструменти статичного аналізу для C++ подібних мов можуть мати різні результати, і не існує золотого стандарту для визначення вразливостей коду. На завершення: кожен з різних інструментів статичного аналізу коду має свої переваги та недоліки.

Відповідно до статичного аналізу інструменти для виявлення дефектів виконання та вразливостей безпеки можна розділити на кілька груп.

Результати експерименту в роботі [12] показують, що системи без успадкування легше модифікувати, ніж системи з трьома або п'ятьма рівнями успадкування. Це відкриття викликає питання про ефективність використання спадковості.

Ідея цього дослідження полягає не тільки в тому, щоб визначити список атрибутів якості коду або переглянути їх ще раз, але й у тому, щоб встановити пріоритети між ними. Тому, визначальними є наступні питання, які потребують опрацювання:

1) визначити атрибути якості ПЗ, якими можна знехтувати, та встановити етапи на яких це можна зробити;

2) визначити достатність використання атрибуту цикломатичної складності;

3) визначити можливість вибору лише частини із атрибутів якості програмного забезпечення для досягнення належного результату тестування;

4) визначити потребу у постійному врахуванні атрибуту Code Coverage.

Постановка завдання. Метою статті є отримання оптимального алгоритму для визначення якості коду виходячи з існуючих параметрів якості коду. Іншими словами, маючи масив параметрів A..Z потрібно встановити, які з них мають найбільший вплив. Постає вибір щодо атрибутів якості ПЗ, якими можна знехтувати у випадку складних систем з мільйоном рядків коду.

Виклад основного матеріалу. Мета методу полягає в аналізі існуючої кодової бази, написаної на C++ або схожій мові, і пошуку/виявлення відомих зразків коду та антишаблонів на основі загальних і спеціальних правил. Відповідно до загальних правил переглядаємо атрибути якості коду, такі як рядки коду, цикломатична складність, показники Чідамбера та Кемерера. Відповідно до спеціальних правил розглядаємо додаткові алгоритми, які можуть ідентифікувати конкретні антишаблони. На відміну від пропріетарних систем, таких як SonarQube [13] та Embold, мета пропонованого методу полягає в тому, щоб розширити інструмент аналізу коду додатковими правилами. Іншими словами, користувач може написати власні правила, а система повинна «вивчити» та ідентифікувати такі правила в майбутніх ітераціях. Мова програмування і середовище виконання повинні бути обрані заздалегідь, оскільки мови ООП сильно відрізняються від процедурних і, відповідно, повинні застосовуватися зовсім інші правила і шаблони. Це може бути будь-яка мова, схожа на C++, як-от Java, PHP тощо. Має автоматично виявлятися на основі розширення файлу. Деякі пункти можуть бути визначені користувачем, коли, наприклад, вихідна папка містить суміш розширень, але для нас важливо використовувати лише певні.

Розглянемо основні кроки алгоритму.

1. Компіляція коду.

2. Підготовка попередньо визначених правил для статичного аналізу.

3. Встановлення мінімальних/максимальних значення для наступних змінних, які обчислюватимуться на рівні класу/методу: Cyclomatic Complexity, Number Of Lines, Response For Class.

4. Рекурсивний пошук файлів на основі розширення (розширень): *.cpp, *.css.

5. Створення набору класів і підмножин методів: знаходження кількості методів, полів, вкладених класів.

6. Розрахунок атрибутів по кожному класу.

7. Розрахунок антишаблонів [14] кожного класу.

8. Знаходження дублікатів коду кожного методу у форматі «клас – метод – кількість дубльованих рядків».

9. Збереження обчислених даних у зовнішньому сховищі, наприклад БД.

На кроці компіляції коду можна аналізувати лише скомпільований код, оскільки не скомпільований код не завжди розпізнається з точки зору аналізатору. Метою цих кроків є застосування відповідного компілятора на основі обраної мови програмування та середовища. Наприклад, компілятор Roslyn слід застосовувати, якщо у нас є ПЗ введення ASP.NET, написане мовою C#.

Підготовка попередньо визначених правил для статичного аналізатора щодо обраної мови програмування містить наступні правила: правила форматування коду, правила іменування, правила безпеки коду, правила коментування коду, правила використання бібліотек і фреймворків, правила розподілу відповідальності. Правила форматування коду – це правила, які визначають стиль написання коду, наприклад відступи, розміщення дужок, розмір і розміщення пробілів тощо. Правила іменування визначають правила іменування змінних, функцій, класів та інших елементів програмного коду. Правила безпеки коду спрямовані на виявлення потенційних проблем безпеки, таких як можливі вразливості, витоки пам'яті, неправильна обробка винятків тощо. Правила коментування коду перевіряють наявність і якість коментарів у програмному кодї, допомагаючи переконатися, що код є зрозумілим і задокументованим. Правила використання бібліотек і фреймворків перевіряють відповідність використання бібліотек і фреймворків певним стандартам і найкращим практикам. Правила розподілу обов'язків (SRP) перевіряють, чи виконують класи та модулі в програмному кодї лише одну відповідальність.

Визначення класів і методів.

1. Читання та розбір файлів, видалення порожніх символів. На цьому етапі відбувається парсинг файлів, ідентифікація унікальних класів.

2. Розкладка класу.

3. Ідентифікація унікальних класів.

4. Визначення сторонніх бібліотек і фреймворків.

5. Визначення зв'язків між методами та класами.

6. Аналіз стилів коду.

7. Визначення точки входу в програму – не весь код і класи можуть бути задіяні тому важливо розуміти де саме точка входу в програмі. Приклад – ПЗ може містити 100 класів, але реально лише 5 використовуються.

Визначення ознак якості ПЗ кожним методом.

1. Визначення кількості рядків коду.

2. Розрахунок цикломатичної складності.

3. Визначення зважених методів для кожного класу.

4. Виконання методів у класі. Обчислення загальної кількості методів у класі.

5. Оцінка трудомісткості кожного методу. Для кожного способу потрібно визначити його складність. Для цього найчастіше використовується цикломатична складність, яка вимірює кількість незалежних шляхів через метод. Метод підсумовування ваги. Сумма значень складності для всіх методів у класі. Якщо всі методи мають однакову вагу (наприклад, вага 1), то здійснити визначення глибини дерева успадкування [15], ідентифікувати всі класи та їхніх суперкласів. Для цього потрібно зібрати усі класи в кодовій базі разом із їхніми прямими суперкласами. Інакше ініціалізувати значення глибини дерева успадкування. Створити словник для зберігання значення глибини дерева успадкування для кожного класу, ініціалізуючи кожне значення DIT рівним 0. Здійснити обхід дерева успадкування. Для кожного класу потрібно пройти його ланцюжок успадкування до кореневого класу та обчислити кількість рівнів.

6. Визначення відповіді для класу. Визначити всі методи в класі. Знайти всі методи, визначені в класі. Визначити зовнішні методи, викликаних кожним методом класу. Для кожного методу класу знайдіть усі методи (як у тому ж класі, так і в інших класах), які він викликає. Обчислення кількості унікальних методів, які можна викликати.

7. Визначення кількості породжуваних класів. Ідентифікація всіх класів та їхніх суперкласів. Розрахунок кількості суперкласів. Для кожного класу потрібно визначити кількість безпосередніх

надкласів. Визначення кількості породжених класів. Ідентифікація всіх класів та їх підкласів. Розрахунок кількості підкласів. Для кожного класу потрібно визначити кількість безпосередніх підкласів. Визначити співвідношення породжуваних і породжених класів. Ідентифікація всіх класів та їхніх батьківських зв'язків. Для кожного класу обчислити відношення кількості підкласів до кількості суперкласів.

На основі розглянутих методів і їх модифікацій було проведено експеримент. Мета експерименту – визначити ефективність застосування різних атрибутів якості коду і дослідження залежності від пріоритету кожного з них. Наприклад, якщо є 10 добре відомих атрибутів, то потрібно визначити, які з них важливі в першу чергу та чи є зв'язок між певними атрибутами.

Експеримент показує, що потрібно уникати складного успадкування. Це також показує, що цикломатична складність та пропуск одного з них не дадуть точних результатів вимірювання якості коду.

Етапи експерименту:

1. Завантаження коду 10-20 популярних проектів з відкритим програмним кодом, написаних на мові C#.

2. Задання списку правил. Цикломатична складність має бути в діапазоні від 20 до 30, де 20 або менше є хорошим рейтингом, а більше 30 – поганим рейтингом. Методи з цикломатичною складністю понад 100–150 необхідно негайно переглянути. Перевищена кількість рядків коду певного класу не повинна перевищувати 800.

3. Написання власного ПЗ, яке може обчислювати показники коду кожного методу/класу на основі розширення файлу (.cs).

4. Програмне забезпечення повинно підтримувати плагін архітектуру, і нові правила можна розширювати. Цей спосіб також дозволяє працювати з набором користувальницьких правил якості коду незалежно.

5. Правила можна записати в текстовому форматі. Наприклад, він може містити діапазон кожного атрибута якості та застосовувати рейтинг програмного забезпечення на основі правила.

Результати експерименту можна представити з такими характеристиками.

1. Назва класу – унікальна назва класу в межах проекту.

2. Назва методу.

3. Номер ітерації – звичайний лічильник. Нарощується кожний раз при новій зміні.

4. Кількість рядків класу. Сюди не відносять коментарі, лише та частина коду яка компілюється.

5. Кількість рядків методу.
 6. Сума складності методів у класі.
 7. Цикломатична складність методу – ціле число. Чим вище значення тим вища складність класу. Сума значень цикломатичної складності усіх методів класу.
 8. Глибина дерева успадкування.
 9. Кількість викликів – підраховує кількість унікальних викликів методу та класу.
 10. Кількість наслідників класу – кількість класів що наслідуються від поточного класу.
 11. Кількість рядків з дубльованим кодом.
 12. Технічний борг методу.
 13. Частота змін методу.
 14. Частота змін класу – як часто метод змінюється.
 15. Інформація про анти шаблони.
 - 15.1. Визначення складності написаного методу. Такі методи важко налагоджувати та тестувати а мінімальні зміни в них можуть породжувати не зовсім очевидні баги. Зазвичай це методи з високою цикломатичною складністю.
 - 15.2. Клас виконує занадто багато одночасних функцій [16] і порушує принцип єдиної відповідальності. Зазвичай такі класи важко модифікувати. Також з нього випливають інші проблеми такі як дублікати коду, погана швидкодія.
 - 15.3. Код який не виконується.
 - 15.4. Код, в якому у методу є потенційні проблеми з найменуванням та форматуванням. Зазвичай вилучується за допомогою статичних аналізаторів коду. В англійській літературі це зазначається як code smell [17].
- Отже, якісний код форматований та зрозумілий, у ньому не має назв змінних які не розкривають її суть. Якісний код містить коментарі.

Якісний код не містить дубляжу коду чи логіки. Останнє іноді не зовсім очевидне але якщо відбувається зчитування з файлу та видаленого ФТП сервера то дуже часто цю логіку можна звести під один знаменник. Якісний код не містить методів з високою Cyclomatic Complexity і таким чином у ньому не має анти-шаблонів God-class чи Спагетті-коду. Якісний код реалізує безпекові принципи, OWASP правил буде достатньо для більшості ПЗ. У випадку якісного коду при ООП підході глибина дерева успадкування та кількість наслідника класу є малими величинами. Якісний код містить автоматизовані тести. Для більшості простих задач буде достатньо почати з простих статичних аналізаторів коду [18, 19]. Отже, найбільш можливою моделлю може бути така, що повертає бали для певного методу:

$$\text{quality_per_method} = (1000 * \text{CC} + \text{DIT} * 100 + \text{RFC} * 20 + \text{NOP} * 15) / \text{LOC}, \quad (1)$$

де CC – цикломатична складність

DIT – глибина успадкування

RFC – кількість унікальних викликів іншими методами та класами

NOP – кількість батьківських класів

LOC – кількість рядків методу

Згідно цієї моделі, які задано формулою (1) отримуємо результати для певного методу.

Висновки. Таким чином, отримано оптимальний алгоритм знаходження якості коду згідно з рядом проведених експериментів. Експеримент показав що визначення якості коду є досить складною задачею, оскільки дуже часто прямої залежності між атрибутами якості коду не має. Також, потрібно оптимізувати алгоритми знаходження потенційно складних методів та класів. Особливо слід звернути увагу на алгоритми пошуку анти шаблонів.

Список літератури:

1. Willenbring J., Walia G. (2024). The utility of complexity metrics during code reviews for CSE software projects.
2. Mi Q., Hao Y., Liwei Ou, Ma W. (2021). Towards using visual, semantic and structural features to improve code readability classification.
3. Mashhadi E., Chowdhury S., Modaberi S., Hemmati H. (2024). An empirical study on bug severity estimation using source code metrics and static analysis.
4. Aghamohammadi A., Mirian-Hosseini S. (2021). Statement frequency coverage: A code coverage criterion for assessing test suite effectiveness.
5. Abualkishik A., Lavazza L. (2021). An empirical evaluation of the “Cognitive Complexity” measure as a predictor of code understandability.
6. Ge K., Han Q. (2024). Hidden code vulnerability detection: A study of the Graph-BiLSTM algorithm.
7. Savenko O., Savenko A., Lysenko S., Markowsky G., & Vasyukiv N. (2020). BOTNET DETECTION APPROACH BASED ON THE DISTRIBUTED SYSTEMS. International Journal of Computing, 19(2), 190-198. <https://doi.org/10.47839/ijc.19.2.1761>
8. Savenko B., Lysenko S., Bobrovnikova K., Savenko O., Markowsky G. Detection DNS Tunneling Botnets // Proceedings of the 2021 IEEE 11th International Conference on Intelligent Data Acquisition and

Advanced Computing Systems: Technology and Applications (IDAACS), IDAACS'2021, Cracow, Poland, September 22-25, 2021.

9. Nicheporuk A., Savenko O., Nicheporuk A., Nicheporuk Y. An android malware detection method based on CNN mixed-data model, CEUR Workshop Proceedings, Vol. 2732, 2020, pp. 198-213
10. Lysenko S, Bobrovnikova K, Kharchenko V, Savenko O. IoT multi-vector cyberattack detection based on machine learning algorithms: traffic features analysis, experiments, and efficiency. *Algorithms*. 2022;15(7):239
11. Iftikhar U., Bin Ali N., Börstler J., Usman M. (2022). A tertiary study on links between source code metrics and external quality attributes.
12. Lei M., Li H., Aundhkar H. (2021). Deep learning application on code clone detection: A review of current knowledge.
13. Alfayez R., Winn R., Alwehaibi W., Venson E., Boehm B. (2022). How SonarQube-identified technical debt is prioritized: An exploratory case study.
14. Huang Z., Yu H., Fan G., Shao Z., Zhou Z., Li M. (2023). On the effectiveness of developer features in code smell prioritization: A replication study.
15. Kumar L., Tummalapalli S., Rathi S., Murthy S., Krishna A., Misra S. (2022). Machine learning with word embedding for detecting web-services anti-patterns.
16. Alkharabsheh K., Alawadi S., Ignaim K., Zanoon N., Crespo Y., Manso Y., A. Taboada J. (2022). Prioritization of god class design smell: A multi-criteria based approach.
17. Alazba A., Aljamaan H. (2020). Code smell detection using feature selection and stacking ensemble: An empirical investigation.
18. Van de Laar P., Corvino R., J. Mooij A. (2023). Custom static analysis to enhance insight into the usage of in-house libraries.
19. Papamichail M., Symeonidis A. (2020). A generic methodology for early identification of non-maintainable source code components through analysis of software releases.
20. Lenarduzzi V., Pecorelli F. (2022). A critical comparison on six static analysis tools: Detection, agreement, and precision.
21. Gnoyke P., Schulze S. (2023). Evolution patterns of software-architecture smells: An empirical study of intra- and inter-version smells.
22. Rhmann W., Pandey B., Ansari G., D.K. Pandey. (2020). Software fault prediction based on change metrics using hybrid algorithms: An empirical study.
23. Aldaej A., Seaman C. (2023). A rule-based decision model to support technical debt decisions: A multiple case study of web and mobile app startups.
24. Kaur N., Singh H. (2020). An empirical assessment of threshold techniques to discriminate the fault status of software.
25. Abbad-Andaloussi A. (2022). On the relationship between source-code metrics and cognitive load: A systematic tertiary review.
26. Cai Y., Kazman R. (2022). Software design analysis and technical debt management based on design rule theory.
27. Sas C., Capiluppi A. (2021). Antipatterns in software classification taxonomies.
28. Yu D., Yang Q., Chen X. (2023). Actionable code smell identification with fusion learning of metrics and semantics.
29. Zakeri-Nasrabadi M., Parsa S. (2022). A systematic literature review on source code similarity measurement and clone detection: Techniques, applications, and challenges.
30. AlOmar E., Ivanov A., Kurbatova Z. (2022). Just-in-time code duplicates extraction.
31. Singh M., Chhabra J. (2023). Machine learning based improved cross-project software defect prediction using new structural features in object oriented software.
32. Recupito G., Pecorelli F., Catolino G. (2023). Technical debt in AI-enabled systems: On the prevalence, severity, impact, and management strategies for code and architecture.
33. Huang F., Madeira H. (2023). Advancing modern code review effectiveness through human error mechanisms.
34. Khatri Y. (2022). An effective software cross-project fault prediction model for quality improvement.
35. Madeyski L., Lewowski T. (2022). Detecting code smells using industry-relevant data.
36. Bibiano A., Uchôa A., K.G. Assunção W. (2022). Composite refactoring: Representations, characteristics and effects on software projects.
37. Alcocer J.P.S., Antezana A. S. (2020). Improving the success rate of applying the extract method refactoring.
38. Fahmideh M., Grundy J., Beydoun G., Zowghi D., Susilo W., Mougouei D. (2020). A model-driven approach to reengineering processes in cloud computing.

39. Zakeri-Nasrabadi M., Parsa S., Jafari S. (2023). Measuring and improving software testability at the design level.

40. N. Alkhomsan M., Alshayeb M., Baslyman M. (2024). Toward a novel taxonomy to capture code smells caused by refactoring.

41. Politowski C., Khomh F., Romano S., Scanniello G., Petrillo F., Guéhéneuc Y., Maiga A. (2020). A large scale empirical study of the impact of Spaghetti Code and Blob anti-patterns on program comprehension.

42. Alkharabsheh K. (2021). A comparison of machine learning algorithms on design smell detection using balanced and imbalanced dataset: A study of God class.

Prokofiev I.G., Savenko O.S., Medzatiy D.M. METHOD OF STATISTICAL ANALYSIS OF SOFTWARE CODE USING COMPLEX PARAMETERS

Software has permeated all areas of human activity – the economy, science, and business cannot function without software, and millions of people are involved in writing and maintaining it, creating an unprecedented impact on security challenges. Whether it's the military or retail, no industry can do without quality software these days, and even a small failure in a distributed system with a large number of users can cause other subsidiary industries to fail. It can be said that since 1990, the amount of software has increased tremendously, as this period was marked by the wide development of computer technology and the spread of computers and the Internet. During this period, a lot of software was written and released in various fields such as operating systems, business applications, games, web applications, mobile applications and many more. In addition, many software are regularly updated and expanded, so the creation of new versions and support of existing programs continues today. Moreover, software has actually become a common commodity, with individual companies selling API (Application Programming Interface), SaaS (Software as a Service) solutions, and this is no different from conventional resources in the field of energy service or supermarket turnover according to the approach "Pay – Get". Due to the high workload, popular software solutions use new architectural approaches to writing software, which significantly increases the complexity of writing support for such software. And if earlier only technical giants such as Google and Apple really needed unique algorithms to create highly loaded software, then in 2024 the trend of microservice architecture requires solid knowledge of building distributed systems. All this imposes significant limitations on the newly created software – the quality of the software must be a measurable quantity and this value must be at least controlled by both developers and management. Quality software is only possible with quality code, which we'll cover next. Today's software systems can be very complex, so it is very important to maintain existing systems and measure quality. In this article, we will look at various methods of evaluating code quality and security in modern software systems. We'll look at various known code quality metrics and how they can be applied depending on the programming language. The purpose of the article is to review existing software code quality indicators and propose new methods of software code quality analysis. The research work is focused on finding new methods based on machine learning that allow finding different anti-patterns and codesmell in a new way. The result of the method is to identify the overall quality of specific software written in C++ in a programming language similar to C# or Java.

Key words: software code quality, static code analyser, code quality attributes.

Самофалов А.В.

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

Терейковський І.А.

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

КОНЦЕПТУАЛЬНА МОДЕЛЬ ФОРМУВАННЯ ВЕБ-ОРІЄНТОВАНИХ БАЗ ДАНИХ ЕМОЦІЙНО ЗАБАРВЛЕНИХ ГОЛОСОВИХ СИГНАЛІВ

Дана стаття розглядає концептуальну модель формування веб-орієнтованих баз даних емоційно забарвлених голосових сигналів. Наведена модель досліджує процес створення та надає перелік критеріїв оцінювання ефективності формування таких баз даних. З'ясовано, що розпізнавання емоцій людини в мовленні є одним із найважливіших завдань, яке виконується щодня при взаємодії людей одних з одними. Також на сьогоднішній день стрімко розвиваються робототехніка та застосунки на основі штучного інтелекту, які намагаються зробити взаємодію з користувачами наближеною до взаємодії між людьми по відчуттям. Для досягнення максимально комфортного користувацького досвіду, ці застосунки та робототехнічні засоби повинні бути натренованими на великих кількостях емоційних даних. Розпізнавання емоцій людини за допомогою автоматизованих комп'ютерних засобів є особливо цінним та актуальним для таких додатків, як розпізнавання емоцій в обслуговуванні клієнтів, моніторинг психічного здоров'я та взаємодія людини з комп'ютером, тощо. На початку даної статті розглянуто перелік основних типів баз даних емоційно забарвлених голосових сигналів та визначено виклики й завдання з якими стикаються дослідники під час їх формування. Після цього проведено аналіз деяких підходів для обробки та класифікації емоційних станів. Наостанок, представлена розроблена модель та наведені критерії ефективності формування веб-орієнтованих баз даних емоційно забарвлених голосових сигналів, що дозволяють спростити процес створення емоційних аудіоданих для навчання нейронних мереж, оскільки виявлено, що цей процес може контролюватися відповідно до попередньо заданих вимог, використовуючи наведені числові метрики. Завдяки цьому взаємодія між людиною і робототехнічними засобами та застосунками з штучним інтелектом може бути суттєво покращена.

Ключові слова: концептуальна модель, бази даних, нейронні мережі, емоція, критерії ефективності.

Постановка проблеми. Розпізнавання емоцій людини в мовленні є однією із найважливіших завдань з яким ми стикаємось кожен день коли взаємодіємо один з одним. Також у наш час стрімко розвивається робототехніка та застосунки на основі штучного інтелекту, які намагаються зробити взаємодію з користувачами максимально наближеною до взаємодії між людьми по відчуттям [1]. Для досягнення цієї мети ці застосунки та робототехнічні засоби мусять бути натренованими на великих кількостях емоційних даних. Однак створення та обробка великої кількості емоційно забарвлених голосових сигналів людини є операцією, яка вимагає великих затрат по часу та людських ресурсів. Тому формалізація процесу формування веб-орієнтованих баз даних емоційно забарвлених голосових сигналів є суттєвою задачею, вирішення якої дозволить створювати емоційні аудіодані для навчання нейрон-

них мереж у більших кількостях, ніж вдається наразі.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Існують різні бази даних емоційних голосових сигналів, що збираються з використанням різних методів, щоб забезпечити широкий спектр емоцій та природність. При цьому використовуються такі поширені підходи:

1. Викликана мова – у цьому методі учасники поміщаються у контрольовані середовища та їм пропонується виконати завдання, призначені для виклику певних емоцій. Наприклад, вони можуть слухати історію, дивитися відео чи брати участь у спрямованих обговореннях, щоб викликати такі емоції, як щастя, сум, гнів чи подив [2].

2. Награна мова – для цього часто використовуються професійні актори, щоб імітувати різні емоційні стани. Їм дають сценарії та просять вимовляти репліки з певними емоційними інтона-

ціями. Цей метод використовується у таких базах даних, як CREMA-D, AESDD та інших [3].

3. Природна мова – деякі бази даних спрямовані на захоплення спонтанного емоційного мовлення в реальних умовах. Це може включати запис розмов, інтерв'ю чи інших взаємодій, у яких емоції виникають природним чином. Потім ці записи ануються для емоційного змісту.

4. Краудсорсингові дані – платформи, такі як Amazon Mechanical Turk, або інші краудсорсингові сервіси використовуються для збору даних про емоційне мовлення у різноманітній групі учасників. Цей метод допомагає швидко збирати великий обсяг даних із різних демографічних груп.

5. Мультимодальний збір даних – деякі бази даних, такі як CMU-MOSEI, включають не лише аудіо, а й відео та текстові дані. Цей мультимодальний підхід забезпечує більш багатий контекст для розуміння емоцій, оскільки він фіксує вирази обличчя, мову тіла та вимовлені слова [1].

Наведені підходи дозволяють зробити бази даних всеосяжними та корисними для різних дослідницьких додатків, включаючи перетворення емоційного голосу, аналіз настроїв та розпізнавання емоцій.

Розглянемо далі підхід природного мовлення, що фокусується на фіксації спонтанних емоційних виразів у реальних умовах. У цьому методі дослідники записують розмови, інтерв'ю, публічні виступи чи інші взаємодії, у яких емоції виникають природним чином. Однак збір даних природного мовлення включає кілька етичних міркувань [4]. По-перше, учасники повинні бути поінформовані про мету запису та надати свою усвідомлену згоду. По-друге, дослідники повинні запровадити конфіденційність, тобто забезпечити захист особистої інформації та відповідально використати отримані записи. Та по-третє, увесь процес збору даних мусить бути максимально прозорим, а саме учасники повинні знати, як використовуватимуться їх дані, та мати можливість відкликати свою згоду у будь-який час.

Після того, як перелічені етичні міркування враховані, а записи зібрані, вони проходять докладний процес анування. Найважливіший крок, це маркування емоцій: навчені анотатори слухають записи та маркують сегменти відповідними емоціями (наприклад, щастя, смуток, гнів). На додачу до цього, анотатори можуть також відзначати контекстні фактори, які можуть впливати на емоційне вираження, такі як тема розмови чи стосунки між тими, хто розмовляє [5].

Для аналізу емоцій у природному мовленні з використанням автоматизованих систем існують певні переліки характеристик для визначення емоційного стану розмовляючого. Ці характеристики допомагають ідентифікувати такі емоції, як, наприклад, щастя, смуток, гнів та страх. Системи розпізнавання емоцій аналізують різні голосові характеристики, зокрема просодія (ритм, наголос та інтонація мови), висота голосу, тон (якість чи характер голосу), темп (швидкість, з якою людина розмовляє) та гучність мовлення.

Розширені моделі машинного навчання також використовуються для обробки та класифікації емоційних станів [6]. Одними з поширених підходів є:

– Згорткові нейронні мережі (CNN): ефективні для отримання ознак з аудіоспектрограм.

– Рекурентні нейронні мережі (RNN): корисні для фіксації тимчасових залежностей у мовленні.

– Моделі Transformer: стають все більш популярними завдяки своїй здатності обробляти довгострокові залежності та складні шаблони.

Звичайно, як і всі інші методи, підхід розпізнавання емоцій у природному мовленні має свої переваги та деякі проблеми. Почнемо з переваг, а саме:

1. Справжність: дані природного мовлення є більш репрезентативними для реальних емоційних виразів у порівнянні з постановочною або викликаною мовою.

2. Багатий контекст: фіксація спонтанних взаємодій забезпечує більш багатий контекст для розуміння емоцій, включаючи невербальні сигнали та ситуативні фактори.

Далі наведемо деякі проблеми при використанні цього підходу:

1. Мінливість: природна мова може бути дуже мінливою, що ускладнює її стандартизацію та аналіз [4] [7].

2. Шум: записи реального світу часто містять фоновий шум, що може ускладнити аналіз [8].

3. Складність анотації: точне маркування емоцій у природній мові потребує кваліфікованих анотаторів і може займати багато часу [9].

4. Культурні відмінності: емоції можуть виражатися по-різному в різних культурах, що потребує адаптивності моделей. Розпізнавання емоцій з використанням природного мовлення – це область, що швидко розвивається, зі значним потенціалом для поліпшення взаємодії людини з комп'ютером і різних інших додатків [6].

Розпізнавання емоцій людини за допомогою автоматизованих комп'ютерних засобів є особливо цінним для таких додатків, як розпізнавання

емоцій в обслуговуванні клієнтів (покращення взаємодії з клієнтами шляхом виявлення розчарування чи задоволення) [4], моніторинг психічного здоров'я (моніторинг емоційного благополуччя та виявлення ознак депресії чи тривоги) та взаємодія людини з комп'ютером (покращення чуйності та емпатії віртуальних помічників та роботів), тощо. У цих сферах розуміння природних емоційних виразів людини має вирішальне значення для покращення досвіду людини від взаємодії з цими системами, та, власне, покращення самих систем на основі зворотного зв'язку.

Постановка завдання. Метою статті є розробка концептуальної моделі формування веб-орієнтованих баз даних емоційно забарвлених голосових сигналів, яка формалізує процес створення таких баз даних та оцінювання ефективності їх формування.

Виклад основного матеріалу. Перед тим як навести концептуальну модель формування веб-орієнтованих баз даних емоційно забарвлених голосових сигналів, спочатку дамо визначення деяким поняттям, оскільки їх визначення варіюються між авторами та джерелами.

– Термін «голос» може мати кілька значень, залежно від контексту, але ми візьмемо фізіологічний – звук, що виробляється людьми та іншими хребетними за допомогою легких та голосових зв'язок у гортані.

– Голосовий сигнал відноситься до електричного представлення звукових хвиль, що виробляються людським голосом. До деяких ключових моментів про голосові сигнали відносяться висота тону, тон і гучність.

– Мовний сигнал зазвичай відноситься до подання усного або письмового мовлення у формі, яку можуть обробляти машини. Мовні сигнали можна аналізувати за різними ознаками, включаючи фонетичні, просодичні, синтаксичні та семантичні ознаки.

– Набір даних (dataset) – це набір даних, зазвичай організований у структурованому форматі, який використовується для аналізу, дослідження чи навчання моделей машинного навчання.

– База даних (database) – це організований набір даних, які зберігаються та доступні в електронному вигляді. Набір даних та база даних – це пов'язані поняття, але вони служать різним цілям і мають різні характеристики. Набори даних зазвичай використовуються для певних аналізів або завдань, в той час як бази даних використовуються для постійного зберігання та керування даними.

– Емоція – це складний психологічний стан, який включає три окремих компоненти: суб'єктивний досвід, фізіологічну реакцію і поведінкову або експресивну реакцію.

– Емоційний стан відноситься до поточного стану емоцій людини у певний момент. Він охоплює почуття та настрої, які відчуються, та на які можуть впливати різні фактори, такі як оточення, думки, фізичний стан та взаємодія з іншими людьми.

– Емоції можна загалом розділити на базові та складні. Ось перелік базових емоцій [2], які універсальні і відчуються людьми у різних культурах: щастя, гнів, відраза, страх, сум і здивування.

Тепер перейдемо безпосередньо до концептуальної моделі формування веб-орієнтованих баз даних емоційно забарвлених голосових сигналів. У самому загальному вигляді ідея формування таких баз даних полягає в наступному: необхідно подати відеофайл певного типу на вхід програми з розпізнавання емоцій по обличчях людини. Після цього, певні кадри будуть помічені як ті, що містять певні наперед визначені емоції. Потім, необхідно виділити аудіофрагменти у ці моменти часу, які відповідають класифікованим емоціям.

Модель формування веб-орієнтованих баз даних емоційно забарвлених голосових сигналів наведена на рис. 1.



Рис. 1. Модель формування веб-орієнтованих баз даних емоційно забарвлених голосових сигналів

Розглянемо кожен етап цієї моделі більш детально. По-перше, як вже було зазначено, нам необхідно підібрати відеофайли особливого типу, а саме ті, в яких будуть присутні обличчя людини в таких положеннях, які дозволять програмі по визначенню емоцій розпізнавати ці певні емоції. Ці відеофайли також повинні містити голосові сигнали в достатній кількості, щоб можна було отримати емоційно забарвлені аудіофрагменти. Що не менш важливо, голосові сигнали людей у цих відеофайлах не повинні накладатися один на одного, тобто у кожен момент часу говорити повинна тільки одна особа. Після цього варто впевнитися, що дані відеофайли гарної якості та

не мають у собі перешкод, як візуального, так і аудіо характеру.

По-друге, необхідно підготувати необхідний інструментарій із програмного та апаратного забезпечення. Під апаратним забезпеченням мається на увазі комп'ютер або ноутбук, який може права та можливості запускати програми. Під програмний інструментарій підпадають програми для розпізнавання зазначеного переліку емоцій людини по її виразу обличчя та програма яка зможе виділити аудіофрагменти із відеофайлу по визначених часових позиціях.

Наступним кроком є власне запуск програми по розпізнаванню емоцій людини по її обличчю для заданого відеофайлу та отримання результатів виконання цієї програми. Далі, базуючись на цих результатах, наступна програма виокремлює відповідні аудіофрагменти з емоційними ознаками із початкового відеофайлу та зберігає їх в попередньо визначеній директорії.

Після цього, настає етап обробки отриманих емоційно забарвлених аудіофрагментів. По-перше, видаляються всі аудіофрагменти, тривалість яких є нижчою, а ніж попередньо встановлене мінімальне значення тривалості. В якості цього значення можуть виступати різні величини, наприклад, півсекунди, або секунда. Наступним кроком є аналіз отриманих аудіофрагментів на тривалість тиші в них, оскільки можуть бути моменти, коли обличчя людини в кадрі вказує на якусь емоційну ознаку, але при цьому в аудіопотоці панує тиша. Таким чином, слід виміряти тривалість цих беззвучних моментів та відняти її від загальної тривалості цього аудіофрагменту і якщо отримане значення виявляється меншим ніж попередньо встановлене мінімальне значення тривалості, то, відповідно, цей аудіофрагмент видаляється.

Нарешті, з отриманих емоційно забарвлених аудіофрагментів формується база даних, яка потім може бути використана для навчання нейромережових моделей.

Перейдемо до критеріїв оцінювання ефективності формування веб-орієнтованих баз даних

емоційно забарвлених голосових сигналів. Деякі з критеріїв взяті з попередньої статті авторів [10], які також доповнені новими і наведені у таблиці 1.

Таблиця 1

Критерії оцінювання ефективності формування веб-орієнтованих баз даних емоційно забарвлених голосових сигналів

Назва критерію	Опис критерію
C ₁	Можливість формування баз даних без залучення професійних акторів
C ₂	Наявність спонтанних висловлювань
C ₃	Наявність візуальних даних акторів, на додачу до голосових висловлювань
C ₄	Наявність можливості автоматичного маркування елементів бази даних
C ₅	Більш ніж один дискретний емоційний стан
C ₆	Можливість автоматичного формування елементів бази даних після запуску програми та відповідного відеофайлу
C ₇	Відповідність сформованих аудіофрагментів до попередньо визначених вимог

Завдяки цим критеріям ефективності можна оцінювати ефективності формування веб-орієнтованих баз даних емоційно забарвлених голосових сигналів. Через це увесь процес можна буде формалізувати та контролювати його відповідність до попередньо заданих вимог завдяки наявним числовим метрикам.

Висновки. У даній статті розроблено концептуальну модель формування веб-орієнтованих баз даних емоційно забарвлених голосових сигналів, яка формалізує процес створення таких баз даних. Розроблена модель та наведені критерії ефективності формування таких баз даних дозволяють спростити процес створення емоційних аудіоданих для навчання нейронних мереж, оскільки цей процес може контролюватися відповідно до попередньо заданих вимог, використовуючи наведені числові метрики. Завдяки цьому, взаємодія між людиною та робототехнічними засобами та застосуваннями з штучним інтелектом може бути суттєво покращена.

Список літератури:

1. Chamishka S., Madhavi I., Nawaratne R., Alahakoon D., De Silva D., Chilamkurti N., Nanayakkara V. A voice-based real-time emotion detection technique using recurrent neural network empowered feature modelling. *Multimedia Tools and Applications*. 2022. <https://doi.org/10.1007/s11042-022-13363-4>
2. Ekman P. Basic Emotions. *Handbook of Cognition and Emotion*. Chichester, UK, 2005. Pp. 45–60. <https://doi.org/10.1002/0470013494.ch3>.
3. Zhou K., Sisman B., Liu R., Li H. Emotional voice conversion: Theory, databases and ESD. *Speech communication*, 137. 2022. Pp. 1–18. <https://doi.org/10.1016/j.specom.2021.11.006>

4. Deschamps-Berger T., Lamel L., Devillers L. End-to-End Speech Emotion Recognition: Challenges of Real-Life Emergency Call Centers Data Recordings. У *2021 9th International Conference on Affective Computing and Intelligent Interaction (ACII)*. IEEE. 2021. <https://doi.org/10.1109/acii52823.2021.9597419>
5. Tits N., El Haddad K., Dutoit T. Emotional Speech Datasets for English Speech Synthesis Purpose: A Review. У *Advances in Intelligent Systems and Computing*. Springer International Publishing. 2019. Pp. 61–66. https://doi.org/10.1007/978-3-030-29516-5_6
6. Christy A., Vaithyasubramanian S., Jesudoss A., Praveen, M. D. A. Multimodal speech emotion recognition and classification using convolutional neural network techniques. *International Journal of Speech Technology*. 2020. №23(2). Pp. 381–388. <https://doi.org/10.1007/s10772-020-09713-y>
7. Larradet F., Niewiadomski R., Barresi G., Caldwell D. G., Mattos, L. S. Toward Emotion Recognition From Physiological Signals in the Wild: Approaching the Methodological Issues in Real-Life Data Collection. *Frontiers in Psychology*, 11. 2020. <https://doi.org/10.3389/fpsyg.2020.01111>
8. Niu M., Jaiswal M., Mower Provost E. From Text to Emotion: Unveiling the Emotion Annotation Capabilities of LLMs. У *Interspeech 2024*. ISCA. 2024. Pp. 2650–2654. <https://doi.org/10.21437/interspeech.2024-2282>
9. Brauwers G., Frasincar F. A General Survey on Attention Mechanisms in Deep Learning. *IEEE Transactions on Knowledge and Data Engineering*, 1. 2021. <https://doi.org/10.1109/tkde.2021.3126456>
10. Дичка І.А., Терейковський І.А., Самофалов А.В., Терейковська Л.О., Романкевич В.О. Множина критеріїв ефективності формування баз даних емоційно забарвлених голосових сигналів. *Електронне фахове наукове видання «Кібербезпека: освіта, наука, техніка»*. 2023. №1(21). С. 65–74. <https://doi.org/10.28925/2663-4023.2023.21.6574>

Samofalov A.V., Tereikovskiy I.A. CONCEPTUAL MODEL OF THE FORMATION OF WEB-ORIENTED DATABASES OF EMOTIONALLY COLORED VOICE SIGNALS

This article considers the conceptual model of the formation of web-oriented databases of emotionally colored voice signals. The given model examines the creation process and provides a list of criteria for evaluating the effectiveness of the formation of such databases. It was found that recognition of human emotions in speech is one of the most important tasks that is performed every day when people interact with each other. Nowadays, robotics and applications based on artificial intelligence are rapidly developing, which try to make the interaction with users closer to the interaction between people by feeling. To achieve the most comfortable user experience, these applications and robotics must be trained on large amounts of emotional data. Human emotion recognition using automated computer tools is particularly valuable and relevant for such applications as emotion recognition in customer service, mental health monitoring, and human-computer interaction, etc. At the beginning of this article, a list of the main types of databases of emotionally colored voice signals is considered and the challenges and tasks faced by researchers during their formation are defined. After that, an analysis of some approaches to the processing and classification of emotional states is carried out. Finally, the developed model is presented and the criteria for the effectiveness of the formation of web-oriented databases of emotionally colored voice signals are presented, which allow to simplify the process of creating emotional audio data for training neural networks, since it is found that this process can be controlled according to the predefined requirements, using the given numerical metrics. Due to this, the interaction between humans and robotics and applications with artificial intelligence can be significantly improved.

Key words: conceptual model, databases, neural networks, emotion, performance criteria.

УДК 681.5

DOI <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2024.5.1/40>**Сельоткін В.О.**Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»**Волощук В.А.**Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

АВТОМАТИЗОВАНІ СИСТЕМИ ОПТИЧНОЇ ПЕРЕВІРКИ ДРУКОВАНИХ ПЛАТ. ОГЛЯД ТЕХНОЛОГІЙ

Друковані плати є основними компонентами сучасної електроніки, забезпечуючи компактність, надійність і високу продуктивність електронних схем. Їх точне виробництво мінімізує ризик ослаблення з'єднань і короткого замикання, що особливо важливо в медичних та аерокосмічних галузях.

Контроль якості у виробництві друкованих плат має важливе значення для забезпечення функціональності, надійності та довговічності електронних пристроїв. Враховуючи складність і точність, необхідні для сучасних електронних схем, суворі заходи контролю якості необхідні на кожному етапі виробництва друкованих плат. Значення контролю якості в цьому контексті підкреслюється кількома критичними факторами. Процеси контролю якості життєво важливі для перевірки функціональної цілісності друкованих плат. Дефекти, такі як замикання, розриви або неправильне розташування компонентів, можуть призвести до несправності пристроїв. Ретельні перевірки якості допомагають виявити та усунути такі дефекти на ранніх стадіях виробничого процесу, гарантуючи, що лише повністю функціональні плати переходять до наступних етапів виробництва. Надійність є ключовим аспектом друкованих плат, особливо у сферах, де збій може мати серйозні наслідки, наприклад, у медичній чи аерокосмічній електроніці. Комплексні протоколи контролю якості, включаючи стрес-тести на вплив навколишнього середовища та перевірку надійності, є важливими для виробництва надійних друкованих плат, які можуть витримувати різні умови експлуатації.

Впровадження ефективних заходів контролю якості може значно знизити виробничі витрати за рахунок мінімізації кількості бракованих продуктів. Раннє виявлення та виправлення проблем запобігає дорогій переробці та втраті матеріалів. Інвестиції в системи контролю якості зрештою ведуть до економії коштів за рахунок зменшення кількості бракованих продуктів і підвищення загальної ефективності виробництва. Сучасні методи контролю якості включають використання автоматизованих систем оптичної перевірки, які забезпечують високу точність і швидкість виявлення дефектів завдяки використанню передових технологій машинного зору та штучного інтелекту.

У статті розглянуто методи і алгоритми, які використовуються для визначення позицій елементів, виявлення дефектів і управління системами контролю. Крім того, досліджено алгоритми контролю та управління системами, які забезпечують ефективну класифікацію дефектів. Використання машинного навчання дозволяє розпізнавати складні дефекти і адаптуватися до нових типів дефектів. Сучасні системи автоматичної оптичної перевірки друкованих плат забезпечують високу точність, швидкість та надійність, що є критично важливим для виробництва якісних електронних пристроїв. Проте, початкові налаштування та конфігурація цих систем можуть бути часозатратними, і вони потребують регулярного обслуговування та переконфігурації. Подальші дослідження і розробки у цій галузі спрямовані на підвищення ефективності та зменшення необхідності ручної конфігурації систем автоматичної оптичної перевірки є необхідними і актуальними.

Ключові слова: друковані плати, методи перевірки, дефекти, оптичний контроль, обробка зображень.

Постановка проблеми. Друковані плати є основними компонентами сучасної електроніки, забезпечуючи компактність, надійність та ефективність електронних пристроїв. В умовах зростаючої складності сучасних електронних схем, забезпечення якості та надійності друкованих плат

є критично важливим. Традиційні методи контролю, такі як ручний візуальний огляд, мають ряд обмежень, включаючи суб'єктивність та високу залежність від навичок інспекторів. Це підкреслює необхідність розвитку автоматизованих систем оптичної перевірки для покращення точності,

швидкості та ефективності контролю якості друкованих плат.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Останні дослідження та публікації зосереджені на розробці удосконалених методів автоматизованої оптичної перевірки, використанні машинного навчання та штучного інтелекту для виявлення дефектів на друкованих платах. Проте, залишаються невирішеними питання щодо підвищення гнучкості та адаптивності до різних типів друкованих плат в системах оптичного контролю якості.

Постановка завдання. Провести огляд сучасних технологій автоматизованої оптичної перевірки друкованих плат. Визначити переваги та недоліки існуючих методів контролю якості. Розглянути можливості впровадження новітніх технологій машинного навчання та штучного інтелекту для покращення точності та ефективності перевірки.

Виклад основного матеріалу. Традиційні методи перевірки друкованих плат зіграли значну роль у забезпеченні якості та надійності електронних пристроїв. Ці методи, насамперед ручний контроль і прості автоматизовані системи, були основою еволюції виробництва друкованих плат. Кожен метод має свої сильні сторони та обмеження, які вкрай важливо розуміти в контексті сучасних досягнень [1]. Ручний візуальний контроль є одним із найстаріших методів контролю якості друкованих плат. Інспектори візуально перевіряють плати на наявність дефектів, таких як проблеми з паянням, неправильне розташування компонентів та фізичні пошкодження. Цей метод залежить від навичок і досвіду інспекторів, займає багато часу та може призвести до людських помилок, особливо у великому виробництві та складних платах. Інспектори використовують стереомікроскоп або збільшувальне скло для огляду поверхні при збільшенні від 10 до 50 разів [2], [3]. Ручний візуальний контроль це трудомісткий процес, який має ряд обмежень, таких як суб'єктивність, втому, брак концентрації та особисті упередження інспекторів. Він вимагає тривалого навчання та досвіду, що може зайняти багато часу та ресурсів, і обмежений гостротою зору інспектора [4], [5]. У сучасному виробничому середовищі зростає потреба в автоматизації контролю якості через впровадження Індустрії 4.0 та попит на високоякісні продукти [6]. Хоча ручний візуальний огляд був традиційним підходом, його обмеження стають дедалі очевиднішими.

Оптичний компаратор це традиційний інструмент для збільшення зображення друкованої плати для детального огляду. Він покращує здатність

інспектора виявляти дрібні дефекти. Компаратор використовує комбінацію оптики, освітлення та технології обробки зображень для порівняння плати з еталонним зображенням. Він може досягати роздільної здатності до 0,1 мкм та має широкий діапазон збільшень і набір методів обробки зображень [7]. Вони вимагають калібрування та налаштування для точних результатів і можуть бути чутливими до умов освітлення та пилу. Складний дизайн друкованої плати може ускладнити створення еталонного зображення. Останні досягнення в машинному навчанні та штучному інтелекті призвели до розробки вдосконалених систем оптичного порівняння, здатних навчатися на основі даних і адаптуватися до нових моделей дефектів [8]. Перехід на виробництва без дефектів вже розпочато, оскільки забезпечує вищу стабільність виробництва та кращу продуктивність порівняно з традиційними методами контролю якості [9].

Методи з використанням рентгенівського випромінювання. Рентгенівський контроль використовується для виявлення прихованих дефектів у багатошарових друкованих платах і паяних з'єднаннях під поверхневими компонентами. Цей метод забезпечує неруйнівний спосіб дослідження внутрішніх структур, виявляючи пустоти, тріщини та інші дефекти. Попри високу точність, рентгенівський контроль якості високозатратний, оскільки вимагає спеціального обладнання та навченого персоналу, що обмежує його використання [10], [11]. Переваги методу включають високу точність, неруйнівний контроль і економічну ефективність. Однак обмежена глибина проникнення, необхідність кваліфікованої інтерпретації зображень та досвіду інспектора є основними недоліками цього підходу [12]. Можливості виявлення рентгенологічного дослідження включають розриви в провідних шляхах, короткі замикання, дефекти паяного з'єднання, невідповідність компонентів, дефекти з'єднання дроту та тріщини на друкованій платі. Zhang Q та ін. запропонували комбінувати рентгенівський аналіз із методами комп'ютерного зору для покращення сегментації результатів, досягаючи точності виявлення дефектів понад 96% [109]. Рентгенівський контроль, у поєднанні з оптичним контролем, забезпечує повну оцінку якості продукту. Оптичний контроль використовує видиме світло для виявлення дефектів на поверхні виробу, але не може виявити внутрішні дефекти, такі як тріщини чи порожнечі. У виробництві оптичний контроль за допомогою рентгена є потужним інструментом для виявлення

дефектів. Оптичний контроль ефективний для виявлення поверхневих дефектів, але має обмеження при виявленні внутрішніх дефектів або прихованих структур. Рентгенівське обстеження може подолати ці обмеження, забезпечуючи точний гібридний підхід [6], [13]. Переваги гібридного підходу включають покращене виявлення дефектів, підвищену точність та зменшення часу перевірки. Цей метод дозволяє виявляти ширший діапазон дефектів і забезпечує точніше виявлення та класифікацію дефектів, зменшуючи ризик хибно-позитивних або хибно-негативних результатів. Використання обох методів одночасно скорочує час перевірки та підвищує ефективність [9].

Сучасні автоматичні методи оптичної перевірки. Системи автоматизованої оптичної перевірки використовують камери та програмне забезпечення для виявлення дефектів на друкованих платах, застосовуючи методи комп'ютерного зору та штучного інтелекту. Вони значно скорочують час перевірки та підвищують точність порівняно з ручними методами, але можуть бути дорогими та вимагати налаштування для різних конфігурацій електронних плат. Проте їх ефективність може знижуватися через недостатнє освітлення або складну структуру плати, що вимагає вдосконалення методів обробки зображень [14]. Такі галузі, як аерокосмічна та автомобільна промисловість, успішно використовують системи оптичного контролю. Виробники скоротили час виробництва на 30% та підвищили точність і ефективність процесів контролю якості [15], [16]. Еволюція виробництва друкованих плат вимагає досконаліших рішень, таких як інтеграція машинного зору та методів штучного інтелекту для покращення контролю якості [17], [18]. Експерименти показали ефективність глибокого навчання для автоматизованого оптичного контролю, з точністю виявлення жорстких та деформівних лінійних об'єктів на високому рівні, мінімізуючи ризик випуску дефектної продукції [19]. Сучасні дослідження охоплюють всі етапи забезпечення якості, від отримання сировини до процесів штампування та складання за допомогою машин для поверхневого монтажу [20]. Chen та ін., пропонують поєднувати традиційні оптичні алгоритми та алгоритми глибокого навчання в сучасних механізми оптичної інспекції. Для зменшення витрат на повторне оцінювання вручну для дефектних продуктів, пропонується механізм повторної перевірки на основі алгоритму глибокого навчання, що використовує дві моделі виявлення дефектів [17]. Автоматизовані системи перевірки друкованих

плат значно покращили контроль якості завдяки використанню технологій машинного зору, штучного інтелекту та робототехніки. Вони забезпечують високу точність і узгодженість, швидше виявляючи дефекти, що знижує рівень браку. Такі системи можуть виявляти широкий спектр дефектів, включаючи проблеми з паяними з'єднаннями, невідповідність компонентів і мікротріщини, покращуючи загальну якість і надійність продукції, зменшуючи витрати на робочу силу та залежність від кваліфікованих інспекторів [3], [21].

Недоліки сучасних автоматизованих систем. Автоматизовані системи також можуть збирати й аналізувати великі обсяги даних під час перевірки, що допомагає вдосконалювати виробничі процеси та прогнозувати потенційні проблеми. Проте, початкові витрати на впровадження цих систем можуть бути значними, що є бар'єром для малих і середніх підприємств. Системи потребують регулярного обслуговування та спеціальних знань для налаштування й усунення несправностей. Вони можуть бути чутливими до умов навколишнього середовища, таких як освітлення та температура, що впливає на точність виявлення дефектів [3], [21]. Незважаючи на переваги, автоматизовані системи не безпомилкові і можуть давати помилкові спрацьовування або помилкові негативи. Постійне калібрування та вдосконалення алгоритмів необхідні для мінімізації цих помилок. Використання методів машинного навчання разом з традиційними методами комп'ютерного зору може підвищити ефективність моделей, зменшуючи кількість необхідних даних для досягнення високої точності [22]. Також, існує потреба в кращих методах прогнозного обслуговування та дефектів [23].

Системи автоматичного оптичного контролю. Комплексна система оптичного контролю друкованих плат складається з кількох ключових компонентів, що працюють разом для точного виявлення дефектів. Основні компоненти включають, камери високої роздільної здатності, освітлення, блок обробки зображень, систему контролю руху, програмне забезпечення для керування. Система оптичного контролю друкованих плат вимагає скоординованої роботи апаратних та програмних компонентів. Камери, освітлення, обробка зображень, контроль руху, надійне керування даними та контроль навколишнього середовища забезпечують ефективну та надійну роботу системи. Останнім часом ведуться активні дослідження і розробки систем автоматичного оптичного контролю. Наприклад, у статті Bellens та ін.

представлено систему візуальної перевірки якості DarwinAI, яка забезпечує багатозадачну перевірку з мінімальним програмуванням та налаштуванням, скорочуючи час інспекції порівняно з ручною перевіркою. Інша система DVQI демонструє значне покращення продуктивності та впливу у виробництві електронних плат [24]. Система оптичної перевірки розроблена Fischer та ін., містить роботизовану платформу з різноманітними датчиками для калібрування параметрів процесу перевірки заснована на оптичних та акустичних датчиках [25]. de Oliveira та ін. запропонували систему, заснована на традиційних комп'ютерного зору і нових методах глибокого навчання, досягла середньої точності понад 90% у виявленні дефектів у лінії виробництва електронних приладів представлено на рис. 1 [26].

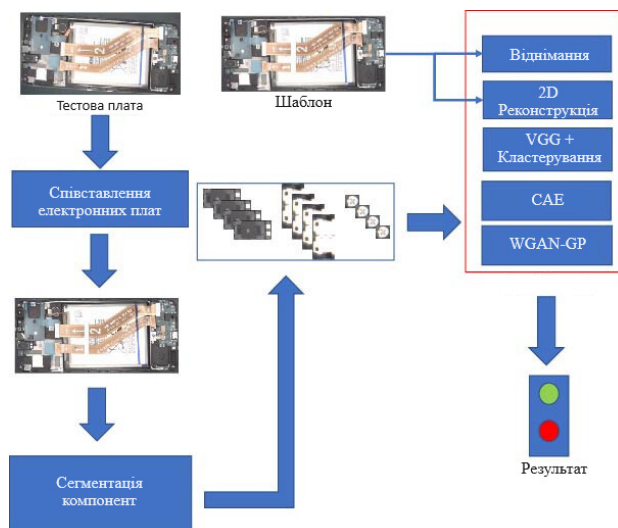


Рис. 1. Алгоритм виявлення дефектів на основі порівняння з шаблоном [26]

Активно проводяться дослідження оптичної інспекції і в інших галузях. Результати цих досліджень можуть бути використані для оптичного контролю електричних друкованих плат. У дослідженні Chen та ін. пропонується інтелектуальна система виявлення дефектів для промисловості гумових цукерок, яка може замінити ручну перевірку, скоротити час обробки та зменшити виробничі витрати, контролюючи якість продукції та ефективність виробничої лінії [27]. У статті [28] пропонується інтегрована концепція «обробка – відповідність – класифікація – діагностика», заснована на комп'ютерному зорі та глибокому навчанні, для діагностики лиття під тиском. Стаття узагальнює метод категоризації несправностей пластикових компонентів, визначає причини дефектів машин для лиття під тиском

і форм. Також розробляються системи в які інтегруються декілька камер чи інших сенсорів. Min C. та ін. представили систему відстеження за кількома камерами для завдання багатокамерної відеоаналітики, що дозволяє уникнути надлишкових задач ідентифікації, використовуючи просторово-часові асоціації об'єктів у полях огляду кількох камер [29]. Robert Massen показав, що промислово перевірку поверхонь можна покращити, відображаючи інтенсивність сірого, кольору і висоту. А використання мультисенсорної камери дозволяє створювати вектор ознак для кожного пікселя, включаючи інтенсивність, відтінок, насиченість та висоту, що значно збільшує точність систем оптичної інспекції [30].

Ключові технології систем оптичного контролю. Сучасні оптичні системи перевірки друкованих плат використовують передові технології для підвищення точності, швидкості та надійності. Камери високої роздільної здатності та алгоритми комп'ютерного зору є ключовими елементами таких систем, забезпечуючи точне виявлення дефектів [13], [31], [32]. Алгоритми машинного зору обробляють зображення для виявлення дефектів, використовуючи розпізнавання образів, виявлення країв і аналізу текстур. Алгоритми машинного навчання підвищують точність цих методів, дозволяючи їм навчатися на попередніх наборах даних [33], [34]. Технології штучного інтелекту і глибокого навчання революціонізують оптичний контроль, дозволяючи системам визначати складні шаблони й аномалії. Моделі, такі як згорткові нейронні мережі, аналізують великі набори даних зображень для виявлення тонких дефектів з високою точністю та мінімальним втручанням людини [35].

Технологія 3D зображення забезпечує тривимірне зображення друкованої плати, дозволяючи перевіряти паяні з'єднання та розміщення компонентів з більшою точністю і надійністю. Це дозволяє ефективно виявляти дефекти, пов'язані з припоєм, такі як недостатня кількість припою чи його зсув [3], [34], [36]. Метод 3D реконструкції з одного вхідного зображення був досліджений з використанням мережі U-Net, яка показала найкращі результати [37]. Гіперспектральне зображення дозволяє виявляти дефекти на основі їх спектральної сигнатури, ідентифікуючи склад матеріалу та забруднення, що не виявляються звичайними зображеннями. Це особливо корисно для виявлення домішок та окислення [38]. Лазерне адитивне виробництво використовує високошвидкісні теплові зображення для моніторингу та про-

гнозування дефектів у процесі [39]. Робототехніка та автоматизація підвищують точність та ефективність оптичних систем контролю, зменшуючи людські помилки та збільшуючи швидкість перевірки [1], [35], [40]. Інтеграція передових технологій значно розширила можливості систем оптичного контролю, забезпечуючи вищу якість і надійність електронних пристроїв. У статті [34] описано методологію розробки вбудованих оптичних вимірювальних приладів для поверхонь деталей, впроваджених у промисловому дослідженні адитивного виробництва. Reichenstein T. та ін. запропонували підхід до планування систем перевірки якості на основі машинного зору, що скорочує час і витрати на оптичну інспекцію [4]. Zhao W., та ін. показали, що перевірка друкованих плат залишається складною та постійно розвивається. Використання алгоритмів комп'ютерного зору, що підвищують пояснюваність, дозволяє зменшити кількість параметрів машинного навчання і необхідних даних для навчання моделей [22]. У статті [41] запропоновано архітектуру автоматизованого машинного навчання для інтелектуальної характеристики компонентів струменевого друку. Kiangala, K. S. та ін. запропонували модель машинного навчання для класифікації загрозливих аномалій у конвеєрних системах [42]. Розроблено схему автоматичного візуального контролю для мікро свердел у виробництві друкованих плат, що використовує стратегію машинного навчання для зниження вимог до обладнання [43]. Пропонується мультимодальна модель глибокого навчання для виявлення несправностей обладнання шляхом об'єднання даних від різних датчиків [44]. Швидкодія алгоритмів є одним з ключових елементів таких систем. Наприклад, для підвищення продуктивності обчислювальні кроки були реалізовані спеціальними апаратними прискорювачами на гетерогенній системі на чіпі Xilinx Zynq, досягаючи 23-кратного прискорення порівняно з програмним рішенням [45]. Застосування FPGA для прискорення обробки в моделі PipeCNN на вбудованій платі Cyclone-VSE DE1-SoC показало хороші результати [46].

Дослідження і розробки в галузі контролю якості. Дослідження в галузі систем оптичного контролю для друкованих плат досягли значного прогресу. Основні напрямки включають використання машинного навчання і штучного інтелекту для покращення точності виявлення дефектів. Наприклад, система на основі глибоких нейронних мереж показала високу точність у визначенні дефектів, зменшуючи кількість неправильних

визначень порівняно з традиційними методами [33], [47]. Висновки досліджень Agarwal A. та ін. демонструють, що триваючі інновації у використанні штучного інтелекту, 3D-зображень, гіперспектральних зображень та систем реального часу суттєво підвищують точність і ефективність перевірки друкованих плат. Ці інновації відповідають зростаючим вимогам сучасного виробництва електроніки, забезпечуючи вищу якість та надійність електронних пристроїв [48]. Jessurun та ін. використовували тривимірну оптичну когерентну томографію для точного вимірювання висоти та об'єму паяних з'єднань, покращуючи виявлення дефектів спаювання [49]. Технологія оптичного контролю якості на основі тривимірної хмари точок отримала значну увагу завдяки високій точності тривимірної інформації. У статті [50] підсумовано прогрес методів визначення якості поверхні продукту за допомогою тривимірної хмари точок. Покращені системи інтегрують передові технології обробки зображень, що підвищує точність перевірки. Kim A. та ін. розробили систему автоматичної оптичної інспекції з багаторкурсним та багатоспектральним зображенням для виявлення як поверхневих, так і підповерхневих дефектів [51]. Chouhan V. та ін. показали, що розробка систем контролю, що працює в реальному часі забезпечує миттєвий зворотний зв'язок під час виробничого процесу. Це дозволяє операторам негайно вносити корекції та зменшувати кількість бракованих продуктів [52]. Інтеграція систем оптичного контролю з технологіями Індустрії 4.0, такими як інтернет речей і аналітика великих даних, забезпечує комплексний контроль якості, прогнозне технічне обслуговування та оптимізацію процесів. Системи перевірки з підтримкою інтернету речей збирають і аналізують дані з кількох точок перевірки протягом усього виробничого процесу [53]. Перевірка якості поверхні друкованих плат за допомогою автоматичного оптичного контролю значно покращується завдяки оптимізації алгоритмів планування шляху, таких як удосконалений алгоритм мурашиної колонії [54]. У статті [55] розглянуто методи виявлення дефектів на основі оптичної, радіологічної, акустичної та інфрачервоної термографії, включаючи традиційні підходи та методи глибокого навчання. У статті Chen T. та ін. запропоновано застосування машинного навчання у виробничій промисловості, зокрема розглянуто різні методи машинного навчання, включаючи контрольовані, напівконтрольовані, неконтрольовані методи та методи підкріплення, а також їх застосування

[11]. У статті [3] досліджено використання глибокого навчання в автоматизованому візуальному контролі та запропоновано потенційні вдосконалення на основі інших академічних досліджень. Моніторинг виробничого середовища стає важливим для запобігання непередбаченим ремонтам та зупинкам. Використання даних та сенсорних технологій з IoT зробило можливим відстеження систем у реальному часі. У статті [6] представлено підхід на основі ШІ та глибокого навчання для візуального контролю, зокрема використання згорткової нейронної мережі для перевірки з точністю 99,86%. У статті Fonseca та ін. обговорено важливість загальнодоступних наборів даних електричних плат для розробки методів перевірки та порівняльного аналізу [21]. Для забезпечення якості друкованих плат проводяться перевірки на різних етапах виробництва. У статті [56] розглянуто використання машинного навчання для кращого виявлення несправностей на виробничій лінії. Розробка нових методів перевірки, заснованих на автоматизованому оптичному огляді, значно підвищує гарантії якості. Набір даних FICS PCB Image Collection допомагає у розвитку методологій захисту апаратного забезпечення [49]. Прототип системи оцінки якості для деталей будівельних лісів на основі комп'ютерного зору демонструє ефективність використання змішаних реальних та синтетичних наборів даних для навчання нейронних мереж [51]. Hoffmann та ін. провели систематичний огляд літератури щодо підходів ШІ та пояснений штучний інтелект для візуального контролю якості у виробництві. Вони показали, що системи на основі ШІ здебільшого зосереджені на виявленні дефектів, тоді як пояснений штучний інтелект використовується рідше. Важливість поясненого штучний інтелект полягає в підвищенні прозорості, інтерпретації та довіри до систем ШІ [57].

Алгоритми визначення позицій елементів. У процесі виробництва друкованих плат можуть виникати дефекти, що може вплинути на продуктивність і надійність друкованих плат. Особливо важливим є використання глибоких нейронних мереж для автоматизованого виявлення об'єктів. За останнє десятиліття значний розвиток алгоритмів виявлення об'єктів зробив алгоритм You Look Only Once (YOLO) одним із найпопулярніших і ефективних методів. YOLO був вперше представлений у 2016 році як одноетапний алгоритм виявлення об'єктів. Оригінальний YOLO досяг найсучасніших результатів на наборі даних PASCAL VOC, перевершуючи традиційні дво-

ступеневі детектори, такі як Faster R-CNN [58]. YOLOv3 додав техніку багато масштабного об'єднання ознак. Корозія розглядається як серйозна проблема безпеки для металевих об'єктів. У дослідженні [59] на основі YOLOv3-tiny пропонується точний детектор металевої корозії на основі глибокого навчання для бортового виявлення металевої корозії. YOLOv5 вирішив проблему балансу ефективності та продуктивності в задачі виявлення дефектів друкованої плати, досягаючи 99,1% середньої точності при 86 кадрах в секунду. У порівнянні з іншими удосконаленими методами, запропонований метод досягає найвищого середнього середнього значення точності, а швидкість виявлення дозволяє використовувати програми в режимі реального часу [60]. В дослідженні [61] було порівняно сім моделей виявлення об'єктів, заснованих на архітектурі YOLO. Результати показали, що спеціально навчена модель визначення позицій об'єктів YOLOv8n показала найкращий результат з середньою точністю 96,6%. Наступною версією моделі став алгоритм CDI-YOLO, що покращує можливості вилучення ознак моделі за допомогою механізму координації уваги та зменшує ресурси необхідні для обчислення [62]. Wang L. та ін. запропонували модель YOLOX, що використовує послідовності засновані на механізмах уваги, що покращує продуктивність і ефективність визначення об'єктів [63]. Zhang H. та ін. провели дослідження спрямовані на підвищення точності та адаптованості до різних завдань [64]. Загалом, розвиток YOLO значно покращив можливості виявлення об'єктів, і подальші дослідження забезпечують нові досягнення в цій галузі.

Алгоритми виявлення дефектів. У галузі перевірки друкованих плат використовуються різні алгоритми для виявлення дефектів. Ці алгоритми використовують передові методи обробки зображень для аналізу зображень, отриманих під час процесу оптичної перевірки. Відповідність шаблону порівнює зображення об'єкту на платі з попередньо визначеним шаблоном ідеального з'єднання. Відхилення у формі, розмірі або текстурі допомагають визначити дефекти. Цей метод ефективний для відомої геометрії електронних плат. Алгоритми навчаються на наборі даних правильно вирівняних компонентів і позначають відхилення як розбіжності. Konovalenko, I. та ін. створили та дослідили U-Net-подібні архітектури з такими енкодерами, як ResNet, SEResNet, SEResNeXt, DenseNet, InceptionV3, InceptionResNetV2, MobileNet і EfficientNet, щоб

порівняти різні методи виявлення подряпини [65]. Fischer та ін. представили систему та методи автоматизованого виявлення неоднорідностей порошкового шару з високою точністю [66]. Навчання без підкріплення можна використовувати в контексті візуального забезпечення якості для виявлення дефектів або аномалій у зображеннях, це було показано у статті [5]. Моделі навчаються на великому наборі даних зображень, щоб визначити характерні шаблони бездефектного зображення, позначаючи будь-які відхилення як потенційні дефекти. Kim H. та ін. запропонували метод виявлення швейних дефектів використовує згорткові нейронні мережі для виявлення зламаних стібків, отриманих з початкових шарів попередньо навченого VGG-16. Запропонований метод досяг точності 92,3% на наборі швейних зображень [67]. Використання глибокої згорткової нейронної мережі для розпізнавання дефектів у тканинах зі складною текстурою дозволяє виконувати задачу на платформах з обмеженими обчисленнями [68]. У статті [69] представлено різні архітектури машинного навчання для автоматичного розрізнення зображень порошкового шару під час селективного лазерного спікання. Архітектура згорткової мережі глибокого навчання на основі сегментації була використана Tabernik D. та ін. для виявлення та сегментації поверхневих аномалій [70]. Tayeh T. та ін. показали, що використання триплетної мережі на основі глибоких залишків допомагає виявляти аномалії, такі як тріщини та вигини [71]. У статті Ulger F. та ін., пропонується архітектура бета-варіаційних автоенкодерів для виявлення аномалій у необмежених середовищах, що покращує точність і розплітання представлень ознак [72]. Методи Grad-CAM і Score-CAM пояснювального штучного інтелекту забезпечують розуміння механізмів визначення тріщин [73]. У статті [74] запропоновано підхід до виявлення аномалій зображень високошвидкісних поїздів за допомогою згорткових нейронних мереж і Vision Transformer. Проект системи для автоматичного виявлення дефектів з'єднання проводів показаний у статті [75] показує важливість контролю якості у виробництві. Gunraj H. та ін. запропонували систему візуального контролю якості на основі глибокого навчання для візуального контролю паяних з'єднань [76]. Mih A. N. та ін. показали, що використання різних попередньо підготовлених моделей класифікаторів допомагають виявляти дефекти використовуючи навчання без підкріплення [77]. Mezher A. M., та Marble A. E. довели, що загальні моделі, навчені на різних

типах дефектів, можуть бути стійкішими до нових дефектів і зменшити необхідність збору даних [78]. Prasad-Rao J. та ін. запропонували підхід до навчання моделей орієнтованих на дані, що може бути використаний для виявлення дефектів друкованих плат на різних етапах виробництва [79]. Chang Y. та ін. застосували методи виявлення дефектів зварних з'єднань на основі обробки зображень та машинного навчання, а також показали необхідність вибору методів і алгоритмів під кожну задачу окремо [80]. Xu L. та ін. використали модель глибокої нейронної мережі тренуваної методом слабкого навчання з підкріпленням для ідентифікації поверхневих тріщин у комутаторах двигуна [81]. У статті [82] розроблено метод виявлення дефектів пайки на основі глибокого навчання. Враховуючи обмеженість навчальних зразків, була запропонована багатозадачна модель PCBMTL, яка одночасно навчає завдання класифікації та сегментації в умовах низького обсягу даних. Щоб вирішити проблему низької швидкості розпізнавання невеликих об'єктів, Van G., та Yoo J. запропонували детектор RT-SPeeDet, що поєднує обробку зображень і згорткову нейронну мережу для досягнення швидкості в реальному часі [83]. Метод виявлення IA-Mask R-CNN із покращеною конструкцією анкерних шкал використовує 560 зображень дефектів деталей автомобільного двигуна, створених за допомогою цифрового мікроскопа [84]. У статті [85] пропонується метод виявлення дефектів друкованих плат на основі Faster RCNN з ResNet50 і функціями Pyramid мереж для кращого виявлення невеликих дефектів. Adibhatla V. A. та ін. використали метод навчання без підкріплення для виявлення дефектів у друкованій платі за допомогою зіставлення піраміди характеристик для кращого виявлення аномалій [86]. У дослідженні Jun H., та Jung I. Y. пропонує метод виявлення дефектних зображень за допомогою згорткової нейронної мережі і фільтра Лапласа, що демонструє покращення на 11,87% порівняно з існуючими методами [15]. У статті [87] розроблено автоматичну систему класифікації гомогених і неоднорідних нановолокон за допомогою гібридної системи машинного навчання. Стаття пропонує згорткову нейронну мережу для перевірки упаковки мікросхеми датчика тиску [88]. Schwebig A. I. M., та Tutsch R. довели, що нейронні мережі підвищують точність розпізнавання дефектів у виробництві електричних вузлів в системах автоматичної оптичної перевірки [89]. Перевірка якості паяних з'єднань є вирішальним кроком у перевірці компонен-

тів друкованих плат. У статті [90] пропонується алгоритм визначення якості паяного з'єднання на основі спрощеної класифікаційної мережі. Спочатку використовується метод сегментації для отримання інформації про паяне з'єднання, далі застосовується перетворення простору кольорів. Об'єднуючи характеристики згорткової нейронної мережі та трансформера, була запропонована

легка модель MobileXT для класифікації дефектів. Схема методу LightJoint-D представлена на рис. 2.

Chavan та ін. розробили автоматизовану систему візуального контролю друкованих плат. Отримане зображення обробляється методами класичного комп'ютерного зору, перетворюючись у градації сірого та бінарне зображення. Виконується контурний аналіз для класифікації резуль-

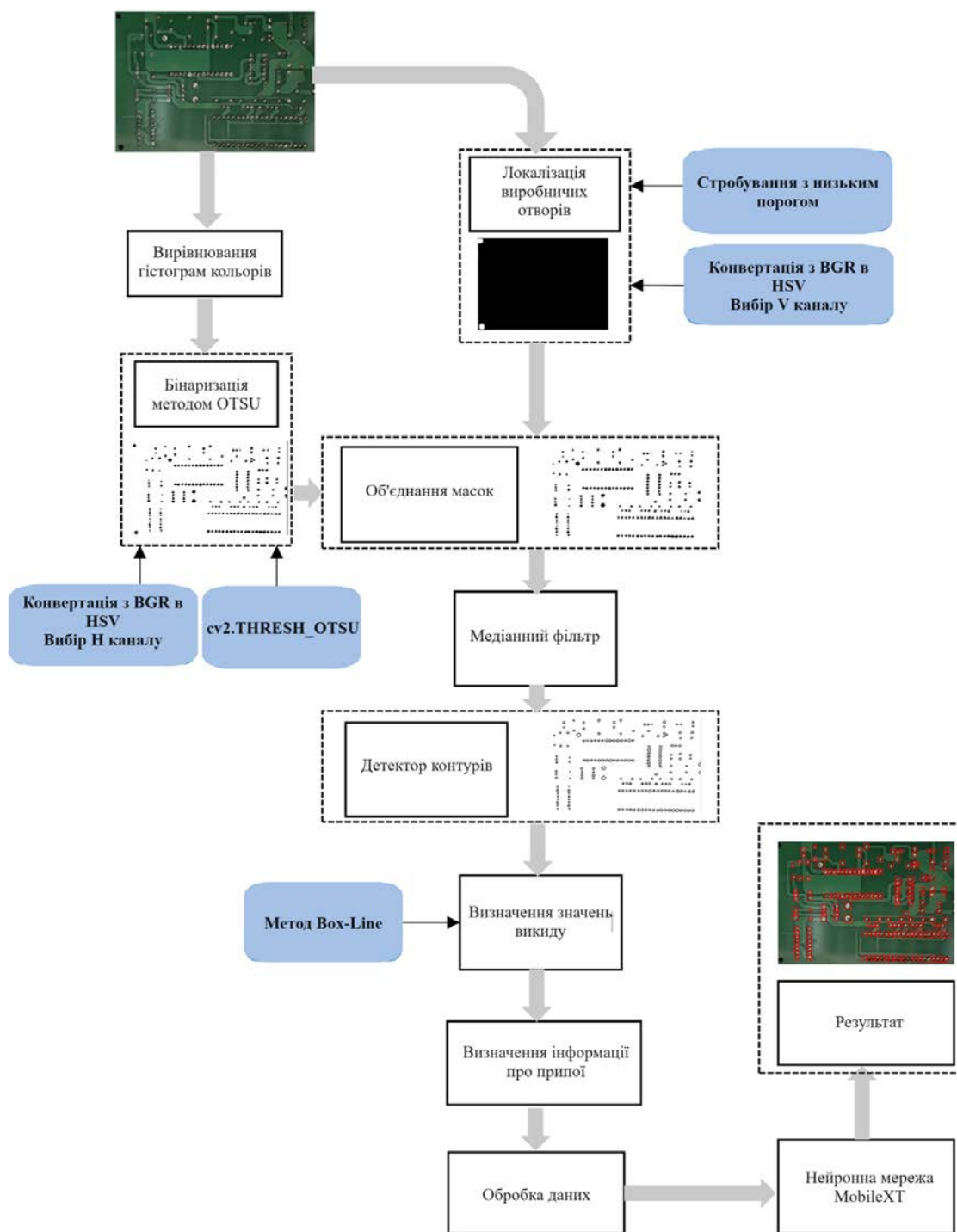


Рис. 2. Блок-схема методу LightJoint-D [90]

татів [91]. Yu G. та ін. запропонували U-подібна мережу семантичної сегментації RUC-Net, що поєднує U-net і Resnet для сегментації тріщин на тротуарі [92]. Alghassab застосував глибокі нейронні мережі для виявлення дефектів у друкованих платах, використовуючи попередньо підготовлені мережі VGG16 і Inception. Згорткові нейронні мережі було застосовано для класифікації тестових даних, показуючи перевагу над класичними методами [47]. В свою чергу, Kim J. та ін. запропонували розширену систему перевірки друкованих плат на основі згорткового автокодера з пропусковим зв'язком. Модель глибокого автоенкодера навчено декодувати оригінальні зображення без дефектів з дефектних зображень [93]. Нова методологія виявлення дефектів на друкованих платах ChangeChip використовує порівняння зображень для пошуку змін, але стикається з проблемами шуму, що можна вирішити за допомогою вдосконалених дескрипторів [94]. У статті [95] автори показують високу пропускну здатність класифікації та виявлення компонентів друкованих плат.

Алгоритми контролю та управління систем. Під час інспекції друкованих плат ефективна класифікація дефектів і точні рішення про відповідність/невідповідність мають вирішальне значення для підтримки високої якості продукції та ефективності роботи. Ці рішення зазвичай приймаються за допомогою комбінації алгоритмів обробки зображень, методів машинного навчання та систем на основі правил. Класифікація на основі правил передбачає визначення конкретних правил або порогових значень для кожного типу дефекту. Наприклад, паяне з'єднання може

бути класифіковано як дефектне, якщо його діаметр менший за мінімально необхідний розмір або якщо в ньому є певний відсоток пустот. Статистичний контроль процесу передбачає використання статистичних методів для моніторингу та контролю процесу. Аналізуються історичні дані про дефекти для встановлення контрольних меж. Результати поточних перевірок постійно порівнюються з цими обмеженнями, щоб виявити тенденції або зміни в процесі, які можуть вказувати на потенційні проблеми. Часто для підвищення точності прийняття рішень використовується комбінація різних методів. Наприклад, система на основі правил може виконувати стандартне виявлення дефектів, тоді як модель машинного навчання керує складними або неоднозначними випадками. Інтегрована система оцінює дефекти за допомогою кількох методів і об'єднує їх результати для прийняття остаточного рішення. Стаття [96] розглядає питання розробки системи для об'єктивного прийняття рішень під час візуального огляду шляхом інтеграції моделей глибокого навчання з експертною системою на основі правил, представлена на рис. 3. Моделі машинного навчання навчаються для класифікації дефектів на нових зображеннях, автоматизуючи процес перевірки. Система правил надає контекстно-залежні рекомендації щодо прийняття рішень, базуючись на знаннях досвідчених інспекторів, забезпечуючи оптимізовану візуальну перевірку на основі даних і знань.

Rezagholi та ін. показали, що застосування нечіткої логіки та обробки зображень допомагає визначити оптимальний склад сполук, виявивши

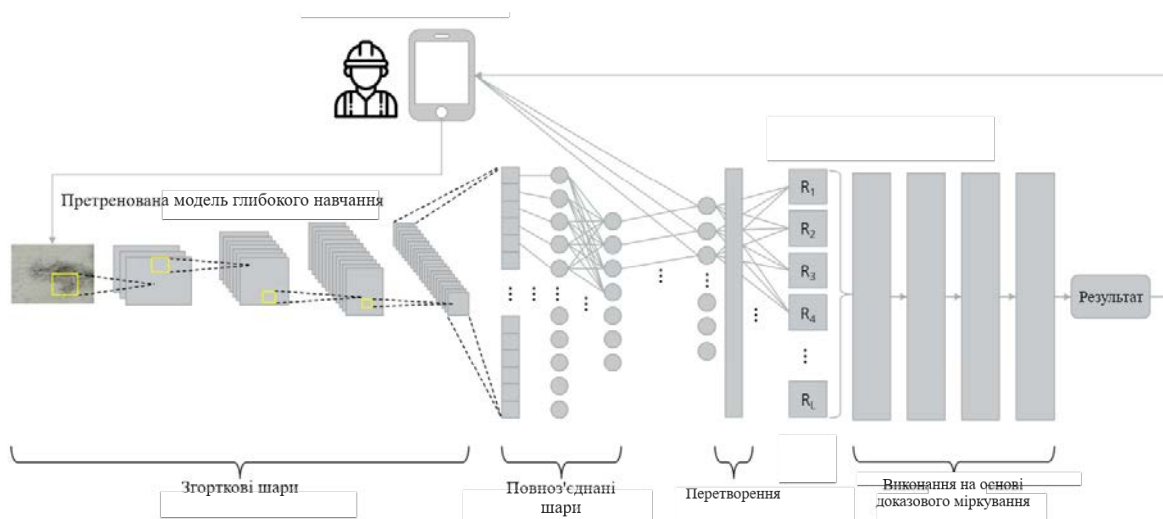


Рис. 3. Система, що інтегрує DL-модель і BRBES разом із інтелектуальними пристроями для візуального контролю [96]

зразок найвищого рангу [97]. Вони реалізували системи на основі гібридної згорткової нейронної мережі поєднує класичні методи обробки зображень з нейронними мережами, ефективно розпізнаючи найтонші структури [98]. Liu та ін. у своєму дослідженні запропонували автономну роботизовану систему оптичного контролю, що вимагає комплексного планування руху. Запропонований метод об'єднує локальний розподіл завдань і скординоване планування руху для зменшення часу перевірки та уникнення конфліктів. Експерименти показали, що розроблений алгоритм демонструє ефективний розподіл завдань і значне скорочення тривалості циклу [40]. У роботі [60] пропонується автоматизація візуального контролю якості за допомогою камери над конвеєром. Продукти класифікуються як дефектні та бездефектні методами

глибокого навчання. Бездефектні продукти продовжують виробництво, а дефектні відокремлюються за допомогою системи управління, яка контролює виробничу лінію. У статті [99] запропоновано два модулі перевірки для автоматичної системи класифікації паяних з'єднань, що показана на рис. 4. "Front-end" система перевірки включає нормалізацію, локалізацію та сегментацію зображень. "Back-end" перевірка передбачає класифікацію паяних з'єднань за допомогою фільтра Лога-Габора та злиття класифікатора. Визначено п'ять різних рівнів якості припою щодо кількості паяльної пасти. Було продемонстровано, що фільтр Лога-Габора досягає високих показників розпізнавання та є стійким до зсуву. Запропонована система не потребує спеціальної системи освітлення, а зображення отримує звичайна цифрова камера.

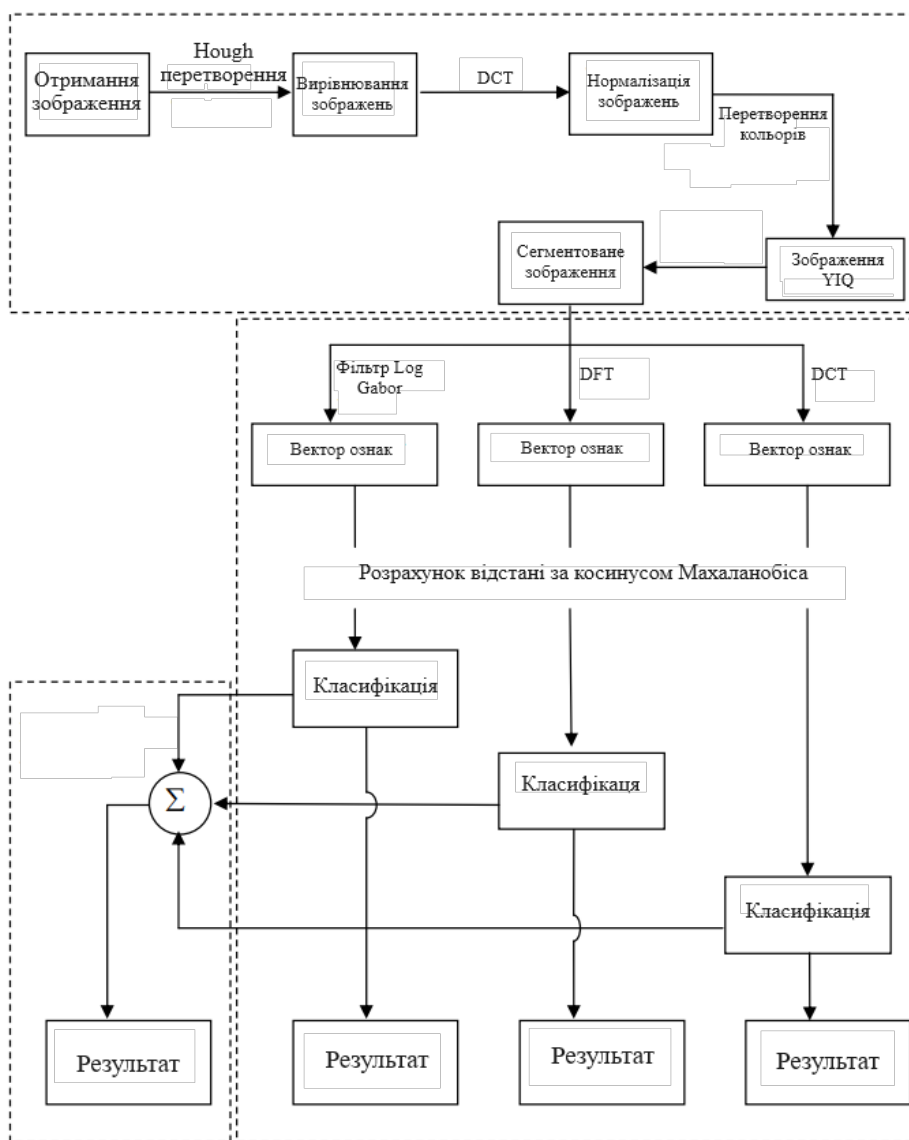


Рис. 4. Процедура перевірки [99]

У статті [100] використовуючи інтелектуальну камеру в системі огляду, статичний і динамічний об'єкт фіксується за долі секунди без розмиття; в результаті отримується оптимальна якість зображення без будь-яких спотворень для кращого аналізу. Запропонована система є дуже точною, точною та гнучкою з розумною вартістю розробки порівняно з іншими моделями. Qiu R. Q. та ін. розробили інтегровану систему автоматичного оптичного контролю для виробничої лінії друкованих плат, у якій спотворення шаблону та відхилення продуктивності з'являються разом із змінами процесу. Ця система була реалізована в послідовному робочому процесі реєстрації зображення, налаштування порогу, розрахунку градієнта зображення, вирівнювання маркера та геометричної трансформації. Результати показали, що, порівняно з іншими існуючими методами, запропонована система та процедура інспекції забезпечують уніфіковані та стандартні операції з ефективністю, які призводять до наукових та однозначних суджень щодо якості шаблону [101].

Висновки. У статті проведено детальний огляд сучасних методів та алгоритмів, що використовуються в системах автоматичної оптичної перевірки друкованих плат. Сучасні автоматизовані системи оптичної перевірки забезпечують високу точність і швидкість виявлення дефектів завдяки використанню передових технологій машинного зору, штучного інтелекту та робототехніки. Вони складаються з кількох ключових компонентів: камер

високої роздільної здатності, освітлення, блоків обробки зображень, систем контролю руху та програмного забезпечення для керування. Кожен з цих елементів грає важливу роль у забезпеченні надійної та ефективної перевірки друкованих плат. У статті розглянуто також алгоритми, які використовуються для визначення позицій елементів і виявлення дефектів. Наприклад, алгоритми на основі моделі YOLO показали високу точність виявлення об'єктів і дефектів на друкованих платах. Інші алгоритми, такі як CDI-YOLO та YOLOX, також демонструють значні покращення у точності та продуктивності. Крім того, досліджено алгоритми контролю та управління системами, які забезпечують ефективну класифікацію дефектів і прийняття рішень щодо відповідності чи невідповідності продукції. Використання машинного навчання дозволяє розпізнавати складні шаблони дефектів і адаптуватися до нових типів дефектів з часом. Загалом, сучасні системи автоматичної оптичної перевірки друкованих плат забезпечують високу точність, швидкість та надійність, що є критично важливим для виробництва якісних електронних пристроїв. Проте, початкові налаштування та конфігурація цих систем можуть бути часозатратними, і вони потребують регулярного обслуговування та переконфігурації. Тому подальші дослідження і розробки у цій галузі спрямовані на підвищення ефективності та зменшення необхідності ручної конфігурації систем автоматичної оптичної перевірки.

Список літератури:

1. Mukhopadhyay A., Murthy L. R. D., Arora M. et al. PCB inspection in the context of smart manufacturing. *Smart Innovation, Systems and Technologies*(2019). Springer Science and Business Media Deutschland GmbH, 2019. DOI:10.1007/978-981-13-5974-3_57. P. 655–663.
2. Bayro-Corrochano E. J. Review of automated visual inspection 1983-1993, Part I: conventional approaches. *Intelligent Robots and Computer Vision XII: Algorithms and Techniques* *Intelligent Robots and Computer Vision XII: Algorithms and Techniques*. Vol. 2055, 20.08.1993. SPIE, 1993. DOI:10.1117/12.150181. P. 128–158.
3. Hütten N., Gomes M. A., Hölken F. et al. Deep Learning for Automated Visual Inspection in Manufacturing and Maintenance: A Survey of Open- Access Papers. *Applied System Innovation*. (02.2024). Multidisciplinary Digital Publishing Institute (MDPI), 2024. DOI:10.3390/asi7010011. 2024.
4. Reichenstein T., Raffin T., Sand C. et al. Implementation of Machine Vision based Quality Inspection in Production: An Approach for the Accelerated Execution of Case Studies. *Procedia CIRP*(2022). Elsevier B.V., 2022. DOI:10.1016/j.procir.2022.09.058. P. 596–601.
5. Zipfel J., Verworner F., Fischer M. et al. Anomaly detection for industrial quality assurance: A comparative evaluation of unsupervised deep learning models. *Computers and Industrial Engineering*. Vol. 177, 03.2023. DOI:10.1016/j.cie.2023.109045.
6. Sundaram S., Zeid A. Artificial Intelligence-Based Smart Quality Inspection for Manufacturing. *Micromachines*. Vol. 14, Issue 3. DOI:10.3390/mi14030570.
7. Smith K. Shedding Light on Optical Comparators. *Quality Digest*. URL: <https://www.qualitydigest.com/static/magazine/may02/html/optcomp.html> (accessed 03/08/2024).
8. Wang W.-C., Chen S.-L., Chen L.-B. et al. A Machine Vision Based Automatic Optical Inspection System for Measuring Drilling Quality of Printed Circuit Boards. *IEEE Access*. Vol. 5, 27.06.2017. P. 10817–10833.

9. Psarommatis F., Sousa J., Mendonça J. P. et al. Zero-defect manufacturing the approach for higher manufacturing sustainability in the era of industry 4.0: a position paper. *International Journal of Production Research*. Vol. 60, Issue 1. P. 73–91. DOI:10.1080/00207543.2021.1987551.
10. Bellens S., Probst G. M., Janssens M. et al. Evaluating conventional and deep learning segmentation for fast X-ray CT porosity measurements of polymer laser sintered AM parts. *Polymer Testing*. Vol. 110, 01.06.2022. P. 107540. DOI:10.1016/j.polymertesting.2022.107540.
11. Chen T., Sampath V., May M. C. et al. Machine Learning in Manufacturing towards Industry 4.0: From ‘For Now’ to ‘Four-Know’. *Applied Sciences (Switzerland)*. Vol. 13, Issue 3. DOI:10.3390/app13031903.
12. Schwerz C., Nyborg L. A neural network for identification and classification of systematic internal flaws in laser powder bed fusion. *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*. Vol. 37, 05.2022. P. 312–318. DOI:10.1016/j.cirpj.2022.02.010.
13. Easton R. A. SMART DIGITAL CAMERAS FOR PRODUCT QUALITY INSPECTION.
14. Yıldız K., Buldu A., Demetgul M. A thermal-based defect classification method in textile fabrics with K-nearest neighbor algorithm. *Journal of Industrial Textiles*. Vol. 45, Issue 5. P. 780–795. DOI:10.1177/1528083714555777.
15. Jun H., Jung I. Y. Enhancement of Product-Inspection Accuracy Using Convolutional Neural Network and Laplacian Filter to Automate Industrial Manufacturing Processes. *Electronics (Switzerland)*. Vol. 12, Issue 18. DOI:10.3390/electronics12183795.
16. Moganti M., Ercal F., Dagli C. H. et al. Automatic PCB Inspection Algorithms: A Survey. *COMPUTER VISION AND IMAGE UNDERSTANDING*. (1996). P. 287–313. 1996.
17. Chen I.-C., Hwang R.-C., Huang H.-C. PCB Defect Detection Based on Deep Learning Algorithm. *Processes*. Вип. 11, № 3. С. 775. DOI:10.3390/pr11030775.
18. Gonzalez D. G., Castilla Y. C., Shaharadaby S. et al. A Ubiquitous Service-Oriented Automatic Optical Inspection Platform for Textile Industry. *Procedia Computer Science*(2021). Elsevier B.V., 2021. DOI:10.1016/j.procs.2021.12.008. P. 217–225.
19. Nguyen H. G., Franke J. Deep learning-based optical inspection of rigid and deformable linear objects in wiring harnesses. *Procedia CIRP*(2021). Elsevier B.V., 2021. DOI:10.1016/j.procir.2021.11.297. P. 1765–1770.
20. Gupta R. Failure Mode and Effects Analysis of PCB for Quality Control Process. *Mapan - Journal of Metrology Society of India*. Vol. 38, Issue 2. P. 547–556. DOI:10.1007/s12647-022-00619-5.
21. Fonseca L. A. L. O., Iano Y., Oliveira G. G. de et al. Automatic printed circuit board inspection: a comprehensible survey. *Discover Artificial Intelligence*. (12.2024). Springer Nature, 2024. DOI:10.1007/s44163-023-00081-5. 2024.
22. Zhao W., Gurudu S. R., Taheri S. et al. PCB Component Detection Using Computer Vision for Hardware Assurance. *Big Data and Cognitive Computing*. Vol. 6, Issue 2. DOI:10.3390/bdcc6020039.
23. Knap P., Lalik K., Bałazy P. Boosted Convolutional Neural Network Algorithm for the Classification of the Bearing Fault form 1-D Raw Sensor Data. *Sensors*. Vol. 23, Issue 9. DOI:10.3390/s23094295.
24. Chung A., Li F., Ward J. et al. DVQI: A Multi-task, Hardware-integrated Artificial Intelligence System for Automated Visual Inspection in Electronics Manufacturing. 12.2023. URL: <http://arxiv.org/abs/2312.09232>
25. Fischer G. K. J., Bergau M., Gómez-Rosal D. A. et al. Evaluation of a Smart Mobile Robotic System for Industrial Plant Inspection and Supervision. 02.2024. URL: <http://arxiv.org/abs/2402.07691>
26. Oliveira G. G. de, Vaz G. C., Andrade M. A. et al. System for PCB Defect Detection Using Visual Computing and Deep Learning for Production Optimization. *IET Circuits, Devices & Systems*. Vol. 2023, 11.2023. P. 1–11. DOI:10.1049/2023/6681526.
27. Chen S. W., Tsai C. J., Liu C. H. et al. Development of an Intelligent Defect Detection System for Gummy Candy under Edge Computing. *Journal of Internet Technology*. Vol. 23, Issue 5. P. 981–988. DOI:10.53106/160792642022092305006.
28. Hu Z., Yin Z., Qin L. et al. A Novel Method of Fault Diagnosis for Injection Molding Systems Based on Improved VGG16 and Machine Vision. *Sustainability (Switzerland)*. Vol. 14, Issue 21. DOI:10.3390/su142114280.
29. Min C., Yi J., Acer U. G. et al. Enabling Cross-Camera Collaboration for Video Analytics on Distributed Smart Cameras. 01.2024. URL: <http://arxiv.org/abs/2401.14132>
30. Massen R. Multisensorial cameras in industrial quality inspection. *AT'95: Advanced Technologies Intelligent Vision* AT'95: Advanced Technologies Intelligent Vision. DOI:10.1109/AT.1995.535971. P. 23–26.
31. Hernandez-Molina E., Ojeda-Magana B., Robledo-Hernandez J. G. et al. Vision system prototype for inspection and monitoring with a smart camera. *IEEE Latin America Transactions*. Vol. 18, Issue 9. P. 1614–1622. DOI:10.1109/TLA.2020.9381804.
32. Malesa M., Rajkiewicz P. Quality control of pet bottles caps with dedicated image calibration and deep neural networks. *Sensors (Switzerland)*. Vol. 21, Issue 2. P. 1–16. DOI:10.3390/s21020501.
33. Niu J., Li H., Chen X. et al. An Improved YOLOv5 Network for Detection of Printed Circuit Board Defects. *Journal of Sensors*. Vol. 2023, 2023. DOI:10.1155/2023/7270093.

34. Syam W. P., Rybalcenko K., Gaio A. et al. Methodology for the development of in-line optical surface measuring instruments with a case study for additive surface finishing. *Optics and Lasers in Engineering*. Vol. 121, 10.2019. P. 271–288. DOI:10.1016/j.optlaseng.2019.04.015.
35. Richter J., Streitferdt D., Rozova E. On the Development of Intelligent Optical Inspections.
36. Szeliski R. *Computer Vision: Algorithms and Applications*. (2010). 2010.
37. Hartung J., Dold P. M., Jahn A. et al. Analysis of AI-Based Single-View 3D Reconstruction Methods for an Industrial Application. *Sensors*. Vol. 22, Issue 17. DOI:10.3390/s22176425.
38. Vater J. M., Gruber F., Grähler W. et al. Prediction of coating adhesion on laser-cleaned metal surfaces of battery cells using hyperspectral imaging and machine learning. *Coatings*. Vol. 11, Issue 11. DOI:10.3390/coatings11111388.
39. Tian Q., Guo S., Melder E. et al. Deep learning-based data fusion method for in situ porosity detection in laser-based additive manufacturing. *Journal of Manufacturing Science and Engineering, Transactions of the ASME*. Vol. 143, Issue 4. DOI:10.1115/1.4048957.
40. Liu Y., Zhao W., Lutz T. et al. Task Allocation and Coordinated Motion Planning for Autonomous Multi-Robot Optical Inspection Systems.
41. Sahu A., Aaen P. H., Damacharla P. An Automated Machine Learning Approach to Inkjet Printed Component Analysis: A Step Toward Smart Additive Manufacturing. 04.2024. URL: <http://arxiv.org/abs/2404.04623>
42. Kiangala K. S., Wang Z. An Effective Predictive Maintenance Framework for Conveyor Motors Using Dual Time-Series Imaging and Convolutional Neural Network in an Industry 4.0 Environment. *IEEE Access*. Vol. 8, 2020. P. 121033–121049. DOI:10.1109/ACCESS.2020.3006788.
43. Duan G., Wang H., Liu Z. et al. A machine learning-based framework for automatic visual inspection of microdrill bits in PCB production. *IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics Part C: Applications and Reviews*. Vol. 42, Issue 6. P. 1679–1689. DOI:10.1109/TSMCC.2012.2216260.
44. Kullu O., Cinar E. A Deep-Learning-Based Multi-Modal Sensor Fusion Approach for Detection of Equipment Faults. *Machines*. Vol. 10, Issue 11. DOI:10.3390/machines10111105.
45. Frustaci F., Spagnolo F., Perri S. et al. Robust and High-Performance Machine Vision System for Automatic Quality Inspection in Assembly Processes. *Sensors*. Vol. 22, Issue 8. DOI:10.3390/s22082839.
46. Kin N. W., Asaari M. S. M., Rosdi B. A. et al. Fpga implementation of cnn for defect classification on cmp ring. *Jurnal Teknologi*. Vol. 83, Issue 5. P. 101–108. DOI:10.11113/jurnalteknologi.v83.16967.
47. Alghassab M. Defect Detection in Printed Circuit Boards with Pre-Trained Feature Extraction Methodology with Convolution Neural Networks. *Computers, Materials & Continua*. Вип. 70, № 1. С. 637–652. DOI:10.32604/cmc.2022.019527.
48. Agarwal A., Ajith A., Wen C. et al. Robotic Defect Inspection with Visual and Tactile Perception for Large-scale Components. arXiv, 2023. DOI:10.48550/arXiv.2309.04590.
49. Jessurun N., Dizon-Paradis O. P., Harrison J. et al. FPIC: A Novel Semantic Dataset for Optical PCB Assurance. 02.2022. DOI:10.1145/3588032.
50. Huo L., Liu Y., Yang Y. et al. Review: Research on product surface quality inspection technology based on 3D point cloud. *Advances in Mechanical Engineering*. (03.2023). SAGE Publications Inc., 2023. DOI:10.1177/16878132231159523. 2023.
51. Kim A., Lee K., Lee S. et al. Synthetic Data and Computer-Vision-Based Automated Quality Inspection System for Reused Scaffolding. *Applied Sciences (Switzerland)*. Vol. 12, Issue 19. DOI:10.3390/app121910097.
52. Chouhan V., Bice D., Burk D. et al. VISUAL, OPTICAL AND REPLICA INSPECTIONS: SURFACE PREPARATION OF 650 MHz NB CAVITY FOR PIP-II LINAC*.
53. Tan L. B., Nhat N. D. P. Prediction and Optimization of Process Parameters for Composite Thermoforming Using a Machine Learning Approach. *Polymers*. Vol. 14, Issue 14. DOI:10.3390/polym14142838.
54. Xiao Z., Wang Z., Liu D. et al. A path planning algorithm for PCB surface quality automatic inspection. *Journal of Intelligent Manufacturing*. Vol. 33, Issue 6. P. 1829–1841. DOI:10.1007/s10845-021-01766-3.
55. Alam L., Kehtarnavaz N. A Survey of Detection Methods for Die Attachment and Wire Bonding Defects in Integrated Circuit Manufacturing.
56. Zakaria S. S., Amir A., Yaakob N. et al. Automated Detection of Printed Circuit Boards (PCB) Defects by Using Machine Learning in Electronic Manufacturing: Current Approaches. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*(03.2020). Institute of Physics Publishing, 2020. DOI:10.1088/1757-899X/767/1/012064.
57. Hoffmann R., Reich C. A Systematic Literature Review on Artificial Intelligence and Explainable Artificial Intelligence for Visual Quality Assurance in Manufacturing. *Electronics (Switzerland)*. (11.2023). Multidisciplinary Digital Publishing Institute (MDPI), 2023. DOI:10.3390/electronics12224572. 2023.
58. Bhattacharya A., Cloutier S. G. End-to-end deep learning framework for printed circuit board manufacturing defect classification. *Scientific Reports*. Вип. 12, № 1. С. 12559. DOI:10.1038/s41598-022-16302-3.

59. Yu L., Yang E., Luo C. et al. AMCD: an accurate deep learning-based metallic corrosion detector for MAV-based real-time visual inspection. *Journal of Ambient Intelligence and Humanized Computing*. Vol. 14, Issue 7. P. 8087–8098. DOI:10.1007/s12652-021-03580-4.
60. Ozdemir R., Koc M. A Quality Control Application on a Smart Factory Prototype Using Deep Learning Methods. *International Scientific and Technical Conference on Computer Sciences and Information Technologies*(09.2019). Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., 2019. DOI:10.1109/STC-CSIT.2019.8929734. P. 46–49.
61. Klco P., Koniar D., Hargas L. et al. Quality inspection of specific electronic boards by deep neural networks. *Scientific Reports*. Vol. 13, Issue 1. DOI:10.1038/s41598-023-47958-0.
62. Xiao G., Hou S., Zhou H. PCB defect detection algorithm based on CDI-YOLO. *Scientific Reports*. Vol. 14, Issue 1. DOI:10.1038/s41598-024-57491-3.
63. Vaswani A., Brain G., Shazeer N. et al. Attention Is All You Need. *Advances in neural information processing systems*. Vol. 30, 2017.
64. Zhang H., Li F., Liu S. et al. DINO: DETR with Improved DeNoising Anchor Boxes for End-to-End Object Detection. 03.2022. URL: <http://arxiv.org/abs/2203.03605>
65. Konovalenko I., Maruschak P., Brezinová J. et al. Research of U-Net-Based CNN Architectures for Metal Surface Defect Detection. *Machines*. Vol. 10, Issue 5. DOI:10.3390/machines10050327.
66. Fischer F. G., Zimmermann M. G., Praetzsch N. et al. Monitoring of the powder bed quality in metal additive manufacturing using deep transfer learning. *Materials and Design*. Vol. 222, 10.2022. DOI:10.1016/j.matdes.2022.111029.
67. Kim H., Jung W. K., Park Y. C. et al. Broken stitch detection method for sewing operation using CNN feature map and image-processing techniques. *Expert Systems with Applications*. Vol. 188, 02.2022. DOI:10.1016/j.eswa.2021.116014.
68. Liu Z., Zhang C., Li C. et al. Fabric defect recognition using optimized neural networks. *Journal of Engineered Fibers and Fabrics*. Vol. 14, 2019. DOI:10.1177/1558925019897396.
69. Westphal E., Seitz H. A machine learning method for defect detection and visualization in selective laser sintering based on convolutional neural networks. *Additive Manufacturing*. Vol. 41, 05.2021. DOI:10.1016/j.addma.2021.101965.
70. Tabernik D., Šela S., Skvarč J. et al. Segmentation-Based Deep-Learning Approach for Surface-Defect Detection. 03.2019. DOI:10.1007/s10845-019-01476-x.
71. Tayeh T., Aburakhia S., Myers R. et al. Distance-Based Anomaly Detection for Industrial Surfaces Using Triplet Networks. 11.2020. URL: <http://arxiv.org/abs/2011.04121>
72. Ulger F., Yuksel S. E., Yilmaz A. Anomaly Detection for Solder Joints Using β -VAE. 04.2021. DOI:10.1109/TCPMT.2021.3121265.
73. Riedel H., Mokdad S., Schulz I. et al. Automated Quality Control of Vacuum Insulated Glazing by Convolutional Neural Network Image Classification. 10.2021. DOI:10.1016/j.autcon.2022.104144.
74. Wang Z., Zhang Y., Luo L. et al. AnoDFDNet: A Deep Feature Difference Network for Anomaly Detection. *Journal of Sensors*. Vol. 8, 2022. P. 1–14. DOI:10.1155/2022/3538541.
75. Giri N., Dugad S., Chhabria A. et al. Automated visual inspection of silicon detectors in CMS experiment.
76. Gunraj H., Guerrier P., Fernandez S. et al. SolderNet: Towards Trustworthy Visual Inspection of Solder Joints in Electronics Manufacturing Using Explainable Artificial Intelligence. 11.2022. URL: <http://arxiv.org/abs/2211.10274>
77. Mih A. N., Cao H., Pickard J. et al. TransferD2: Automated Defect Detection Approach in Smart Manufacturing using Transfer Learning Techniques. 02.2023. URL: <http://arxiv.org/abs/2302.13317>
78. Mezher A. M., Marble A. E. A Novel Strategy for Improving Robustness in Computer Vision Manufacturing Defect Detection. 05.2023. URL: <http://arxiv.org/abs/2305.09407>
79. Prasad-Rao J., Heidary R., Williams J. Detecting Manufacturing Defects in PCBs via Data-Centric Machine Learning on Solder Paste Inspection Features. 09.2023. URL: <http://arxiv.org/abs/2309.03113>
80. Chang Y., Xue Y., Zhang Y. et al. Research on PCB solder joint defect detection method based on machine vision. (27.06.2023). DOI:10.1117/12.2680409. P. 135.
81. Xu L., Lv S., Deng Y. et al. A Weakly Supervised Surface Defect Detection Based on Convolutional Neural Network. *IEEE Access*. Vol. 8, 2020. P. 42285–42296. DOI:10.1109/ACCESS.2020.2977821.
82. Tsang S. H., Suo Z., Chan T. T. L. et al. PCB Soldering Defect Inspection Using Multitask Learning under Low Data Regimes. *Advanced Intelligent Systems*. Vol. 5, Issue 12. DOI:10.1002/aisy.202300364.
83. Ban G., Yoo J. Rt-speedet: Real-time ip-cnn-based small pit defect detection for automatic film manufacturing inspection. *Applied Sciences (Switzerland)*. Vol. 11, Issue 20. DOI:10.3390/app11209632.
84. Zhu H., Wang Y., Fan J. IA-Mask R-CNN: Improved Anchor Design Mask R-CNN for Surface Defect Detection of Automotive Engine Parts. *Applied Sciences (Switzerland)*. Vol. 12, Issue 13. DOI:10.3390/app12136633.

85. Hu B., Wang J. Detection of PCB Surface Defects with Improved Faster-RCNN and Feature Pyramid Network. *IEEE Access*. Vol. 8, 2020. P. 108335–108345. DOI:10.1109/ACCESS.2020.3001349.
86. Adibhatla V. A., Huang Y.-C., Chang M.-C. та ін. Unsupervised Anomaly Detection in Printed Circuit Boards through Student–Teacher Feature Pyramid Matching. *Electronics*. Вип. 10, № 24. С. 3177. DOI:10.3390/electronics10243177.
87. Ieracitano C., Paviglianiti A., Campolo M. et al. IEEE/CAA JOURNAL OF AUTOMATICA SINICA, VOL. X, NO. X, X X 1 A novel automatic classification system based on hybrid unsupervised and supervised machine learning for electrospun nanofibers.
88. Deng M., Zhang Q., Zhang K. et al. A Novel Defect Inspection System Using Convolutional Neural Network for MEMS Pressure Sensors. *Journal of Imaging*. Vol. 8, Issue 10. DOI:10.3390/jimaging8100268.
89. Schwebig A. I. M., Tutsch R. Intelligent fault detection of electrical assemblies using hierarchical convolutional networks for supporting automatic optical inspection systems. *Journal of Sensors and Sensor Systems*. Vol. 9, Issue 2. P. 363–374. DOI:10.5194/jsss-9-363-2020.
90. Zhang Z., Zhang W., Zhu D. et al. Printed circuit board solder joint quality inspection based on lightweight classification network. *IET Cyber-systems and Robotics*. Vol. 5, Issue 4. DOI:10.1049/csy2.12101.
91. Chavan R. R., Chavan S. A., Dokhe G. D. et al. Quality Control of PCB using Image Processing. *International Journal of Computer Applications*. (2016). P. 975–8887. 2016.
92. Yu G., Dong J., Wang Y. et al. RUC-Net: A Residual-Unet-Based Convolutional Neural Network for Pixel-Level Pavement Crack Segmentation. *Sensors*. Vol. 23, Issue 1. DOI:10.3390/s23010053.
93. Kim J., Ko J., Choi H. et al. Printed circuit board defect detection using deep learning via a skip-connected convolutional autoencoder. *Sensors*. Vol. 21, Issue 15. DOI:10.3390/s21154968.
94. Fridman Y., Rusanovsky M., Oren G. ChangeChip: A Reference-Based Unsupervised Change Detection for PCB Defect Detection. 09.2021. URL: <http://arxiv.org/abs/2109.05746>
95. Li B., Palayew S., Li F. et al. PCBDet: An Efficient Deep Neural Network Object Detection Architecture for Automatic PCB Component Detection on the Edge. 01.2023. URL: <http://arxiv.org/abs/2301.09268>
96. Mende H., Peters A., Ibrahim F. et al. Integrating deep learning and rule-based systems into a smart devices decision support system for visual inspection in production. *Procedia CIRP*(2022). Elsevier B.V., 2022. DOI:10.1016/j.procir.2022.05.254. P. 305–310.
97. Rezagholi F., Hesarinejad M. A. Integration of fuzzy logic and computer vision in intelligent quality control of celiac-friendly products. *Procedia Computer Science*(2017). Elsevier B.V., 2017. DOI:10.1016/j.procs.2017.11.246. P. 325–332.
98. Schlosser T., Beuth F., Friedrich M. et al. A Novel Visual Fault Detection and Classification System for Semiconductor Manufacturing Using Stacked Hybrid Convolutional Neural Networks. *IEEE International Conference on Emerging Technologies and Factory Automation, ETFA*(09.2019). Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., 2019. DOI:10.1109/ETFA.2019.8869311. P. 1511–1514.
99. Mar N. S. S., Yarlagadda P. K. D. V., Fookes C. Design and development of automatic visual inspection system for PCB manufacturing. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*. Vol. 27, Issue 5. P. 949–962. DOI:10.1016/j.rcim.2011.03.007.
100. Sahoo S. K., Pine S., Mohapatra S. K. et al. An effective quality inspection system using image processing techniques. *2015 International Conference on Communications and Signal Processing (ICCSP) 2015 International Conference on Communications and Signal Processing (ICCSP)*. DOI:10.1109/ICCSP.2015.7322748. P. 1426–1430.
101. Qiu R. Q., Tsai M. L., Chen Y. W. et al. Integrated Automatic Optical Inspection and Image Processing Procedure for Smart Sensing in Production Lines. *Sensors*. Vol. 24, Issue 5. DOI:10.3390/s24051619.

Selotkin V.O., Voloshchuk V.A. AUTOMATED OPTICAL INSPECTION SYSTEM OF PRINTED CIRCUIT BOARDS. TECHNOLOGY OVERVIEW

Printed boards are the main components of modern electronics, ensuring compactness, reliability and high performance of electronic circuits. Their precision manufacturing minimizes the risk of loose connections and short circuits, which is especially important in the medical and aerospace industries.

Quality control in the production of printed circuit boards is important to ensure the functionality, reliability and durability of electronic devices. Given the complexity and precision required for today's electronic circuits, strict quality control measures are necessary at every stage of PCB production. The importance of quality control in this context is underscored by several critical factors. Quality control processes are vital to verify the functional integrity of printed circuit boards. Defects such as short circuits, breaks, or misalignment of components can cause devices to malfunction. Rigorous quality checks help detect and eliminate such defects early in the manufacturing process, ensuring that only fully functional boards proceed to the next stages of

production. Reliability is a key aspect of printed circuit boards, especially in areas where failure can have serious consequences, such as medical or aerospace electronics. Comprehensive quality control protocols, including environmental stress testing and reliability testing, are essential to produce reliable PCBs that can withstand a variety of operating conditions.

Implementation of effective quality control measures can significantly reduce production costs by minimizing the number of defective products. Early identification and correction of problems prevents costly rework and wasted materials. Investments in quality control systems ultimately lead to cost savings by reducing the number of defective products and increasing overall production efficiency. Modern quality control methods include the use of automated optical inspection systems that provide high accuracy and speed of defect detection thanks to the use of advanced machine vision and artificial intelligence technologies.

The article presents the methods and algorithms used to determine the positions of elements, detect defects, and control control systems. In addition, algorithms for control and management of systems, which ensure effective classification of defects, have been studied. Using machine learning allows you to recognize complex defects and adapt to new types of defects. Modern systems of automatic optical inspection of printed circuit boards provide high accuracy, speed and reliability, which is critical for the production of quality electronic devices. However, initial setup and configuration of these systems can be time-consuming and require regular maintenance and reconfiguration. Further research and development in this field aimed at increasing efficiency and reducing the need for manual configuration of automatic optical inspection systems is necessary and relevant.

Key words: *printed circuit boards, inspection methods, defects, optical control, image processing.*

УДК 004.7

DOI <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2024.5.1/41>**Скулиш М.А.**Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»**Дмитренко О.А.**Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

МЕТОД ОРГАНІЗАЦІЇ МІКРОСЕРВІСІВ НА СЕРВЕРНИХ ГРУПАХ KUBERNETES

У статті розглянуто сучасні методи оптимізації розподілу обчислювальних ресурсів у хмарних середовищах шляхом організації мікросервісів. Основна увага зосереджена на декомпозиції монолітних додатків та мікросервісів з високими вимогами до ресурсів, що дозволяє підвищити ефективність використання серверних потужностей. Авторі пропонують метод кластеризації мікросервісів з використанням алгоритмів KMeans та DBSCAN, що дозволяє ефективніше групувати сервіси за їхньою поведінкою та навантаженням. Це дає можливість оптимізувати процес балансування навантаження та забезпечити більш стабільну роботу системи при пікових навантаженнях. Зокрема, у статті розглядається як використовувати запропонований підхід в роботі оркестраторів контейнерів, таких як Kubernetes, для управління мікросервісами. Авторі описують концепцію використання балансувальників "sidecar", що розгортаються поруч із кожним контейнером мікросервісу для маршрутизації запитів. Такий підхід дозволяє уникнути "єдиного вузла відмови" та забезпечує більш рівномірний розподіл запитів між вузлами. Особлива увага приділяється енергоефективності та оптимальному використанню ресурсів. У статті розглядаються методи поділу мікросервісів з високими вимогами до ресурсів на менші компоненти, що дозволяє гнучкіше керувати системою при змінних навантаженнях. Така декомпозиція знижує ризики перевантаження системи і підвищує її загальну продуктивність. Така робота є важливою для забезпечення стабільності сучасних хмарних систем, зокрема у контексті швидкого розвитку технологій мікросервісної архітектури та контейнеризації.

Ключові слова: доповнення мікросервісів, хмарні обчислення, кластеризація мікросервісів, енергоефективність, оптимальне завантаження ресурсів, Kubernetes.

Постановка проблеми. Архітектура мікросервісів стала пануючою в хмарному середовищі. Вона спрощує розробку додатків, розбиваючи монолітні застосунки на управляючі мікросервіси, які можна розробляти та розгортати незалежно від усього цілого. Однак перехід від монолітної або простої багаторівневої архітектури до розподіленої мікросервісної призводить до нових викликів через більш складну топологію додатків. Особливою проблемою при автоматичному керуванні продуктивністю мікросервісів є те, що, оскільки кожен компонент сервісу масштабується незалежно вгору та вниз, це може легко призвести до проблем нерівномірного навантаження на загальні послуги зв'язку, які використовуються кількома компонентами. Традиційні алгоритми балансування навантаження були розроблені для централізованих балансувальників, розташованих між групою клієнтів та фермою серверів. Проте ці алгоритми не ефективно переносяться на розподі-

лену мікросервісну архітектуру, де балансувальники навантаження розгортанні на боці клієнта.

Аналіз останніх досліджень і публікацій.

Останні роки дослідники активно працюють над розвитком архітектур мікросервісів і їхньої оптимізації в хмарних середовищах. У статті [1] О. Аль-Дебагі та П. Мартінек порівнюють мікросервісні та монолітні архітектури, акцентуючи увагу на перевагах розподілених систем, зокрема, на можливості незалежного масштабування компонентів і їхньої гнучкості. Це дозволяє значно покращити ефективність роботи програмних систем у різних середовищах. У публікаціях [2, 7] розглядаються підходи до визначення груп мікросервісів для ефективного використання обчислювальних ресурсів, що дозволяє підвищити продуктивність систем та оптимізувати балансування навантаження. Їхні роботи надають рекомендації щодо організації мікросервісів у Kubernetes, зокрема з використанням методів кластеризації

KMeans і DBSCAN для групування за схожими характеристиками навантаження. Інші дослідження, наприклад [3], пропонують стратегії для підвищення відмовостійкості мікросервісів у IoT середовищах, а також методи для забезпечення надійності при змінних умовах навантаження. Отже, сучасні дослідження спрямовані на оптимізацію використання ресурсів у хмарних системах за допомогою архітектур мікросервісів, а також на впровадження більш гнучких і стійких до помилок рішень для забезпечення ефективної роботи додатків.

Постановка завдання. Метою статті є дослідження методів організації мікросервісів у середовищі Kubernetes для ефективнішого розподілу обчислювальних ресурсів. Це передбачає оптимізацію використання потужностей серверів через декомпозицію монолітних додатків і мікросервісів з високими вимогами до ресурсів. А також аналіз технік групування мікросервісів за моделями навантаження та застосування алгоритмів кластеризації для поліпшення продуктивності системи.

Виклад основного матеріалу.

Інфраструктура для обслуговування мікросервісів

Мікросервіси стали все більш популярними завдяки різноманітним перевагам, таким як легкість розгортання, постійна інтеграція, незалежний розвиток та інші. У більшості сучасних сценаріїв мікросервіси розгортаються як контейнери в кластерах, керованих оркестратором, таким як Kubernetes. Використання шаблонів мікросервісів, пов'язаний з контейнерними кластерами, стало дуже популярним. Що в свою чергу призвело до зменшення ролі централізованих балансувальників навантаження на одному вузлі. Замість цього, балансувальники навантаження на боці клієнта розгортаються поруч із кожним контейнером служби як "sidecar", як показано на рис. 1. Перевага використання цього принципу полягає в тому, що балансувальник вилучається як єдиний точковий вузол відмов або проблем з продуктивністю.

У розгортанні мікросервісів загальним явищем є те, що фонові сервіси можуть бути використані кількома вихідними компонентами, кожен з яких може бути реплікованим. У такому сценарії кожен вихідний вузол надсилає лише невелику частину від загальної кількості запитів, які отримує кожен вихідний вузол. Це призводить до розходження між фактичним завантаженням вихідних вузлів та оцінкою того завантаження, яке мають вихідні вузли. У результаті продуктивність додатку може

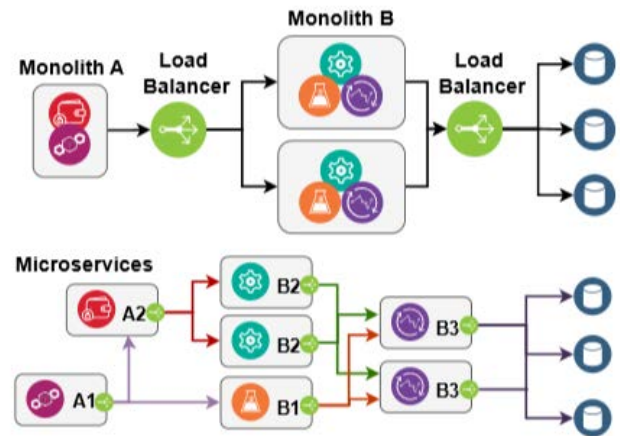


Рис. 1. Багаторівневий додаток, побудований на основі монолітних сервісів (зверху), може бути розкладений на компоненти мікросервісів (знизу), що потенційно поліпшує практики розробки, але ускладнює топологію додатку. Балансувальники навантаження "sidecar" (зелені круги) розгортані поруч із кожним компонентом мікросервісу для маршрутизації запитів до вузлів обслуговування (нижні вузли)

швидко погіршитися через неправильні рішення, прийняті такими «локальними» алгоритмами.

Поділ мікросервісів з високими вимогами до ресурсів

Архітектура мікросервісів стає все більш популярною, оскільки дозволяє розділити монолітний додаток на окремі менші сервіси. Це сприяє скороченню часу розробки, прискорює цикли впровадження, забезпечує можливість використання різних технологічних стеків для окремих компонентів додатку, а також спрощує заміну окремих частин і дозволяє безперервно інтегрувати зміни без впливу на роботу всієї системи.

Для ефективного керування мікросервісами необхідно контролювати його розміри, тобто вимоги до обчислювальних ресурсів. Мікросервіс, який має високі вимоги до ресурсів, потребує розділення. Для вирішення задачі ефективного обслуговування мікросервісів пропонується виконати процедури групуванням та пошуком схожих та взаємодоповнюючих мікросервісів. Однак це не дасть своїх результатів без необхідної фільтрації мікросервісів, які можуть не підійти. Це мікросервіси з надзвичайно високими вимогами до ресурсів. Позначимо як момент часу, коли навантаження досягає максимального значення. Тоді критерій для поділу виглядає наступним чином:

$$P_{t_{\max}} + \delta > P_{\text{boundary}} \quad (1)$$

Ці мікросервіси повинні бути розділені на менші частини, якщо їх можна розбити на частини.

Можливо, це буде монолітний додаток, оскільки ідея мікросервісів пов'язана з зазвичай невеликими завданнями, які відокремлені від інших [1], тому вони не повинні займати багато місця. Більше інформації про поділ мікросервісів та використання меж можна знайти в [2]. Такий поділ може допомогти передбачити час запуску мікросервісів і підготувати додаткові сервери, встановивши на них передстартові дані та записавши останню актуальну інформацію, наприклад, про холодний, теплий або гарячий стан очікування [3].

При декомпозиції монолітного додатку на менші компоненти доцільно базувати сегментацію на звичайному або середньому навантаженні, з яким працює система. Для періодів, коли навантаження перевищує середнє, ефективно передбачити додаткові екземпляри моноліту, які налаштовані на обробку підвищеного попиту. Ця стратегія гарантує, що система залишатиметься швидкою та стабільною під час пікових навантажень, водночас оптимізуючи використання ресурсів під час нормальної роботи. На рис. 2 наведена візуалізація цього процесу.

Існують ситуації, коли створення додаткових екземплярів програми може бути недоцільним або не вигідним. Наприклад, якщо додаток починає послідовно отримувати незвично великі повідомлення – замість невеликих, частих – це може призвести до перевантаження ресурсів каналу. Це слід розглядати як винятковий випадок. Крім того, можна переробити код мікросервіса так, щоб керування передачею даних здійснювалося більш ефективно, тим самим зменшуючи потребу в додаткових екземплярах.

Для цієї частини алгоритму будуть наступні вхідні значення:

«canChunk» – ця характеристика вказує на те, чи можна розділити мікросервіс на менші, більш керовані частини, та максимально можливі значення, на основі яких буде відбуватися відсікання надмірних навантажень:

- $P_{boundary}$ RAM
- $P_{boundary}$ CPU
- $P_{boundary}$ Channel

Алгоритм поділу наступний:

1. Визначити мікросервіси з вимогами до ресурсів, що перевищують $P_{boundary}$ RAM, $P_{boundary}$ CPU або $P_{boundary}$ Channel.

2. Перевірити характеристику «canChunk».

3. Якщо (1) виконується, розділити мікросервіси з високими вимогами (опис та приклад наведено нижче).

4. Сформувати окрему групу «Високовимогливих мікросервісів» для тих, які не можна розбити на частини, але які перевищують межі. Елементи з цієї групи займатимуть окремі великі ресурси і не братимуть участі в наступному алгоритмі.

Поділ, згаданий у 3-му пункті, відбувається, якщо мікросервіс або моноліт можна і потрібно розбити на частини, він розбивається на менші частини з вимогами до ресурсів нижче максимальних порогів. Такий поділ здійснюється лише тоді, коли конкретна характеристика перевищує своє мінімальне значення на певний відсоток, відомий як « Δ » (дельта), а їх сума є нижчою за поріг. Δ являє собою додатковий відсоток, який слід додати до мінімального значення характеристики, що викликає поділ.

Нехай – мінімальний поріг для характеристики, – відсоток збільшення від 0% до 100%, – максимальний поріг. Ця формула повинна також включати невеликий відсоток варіацій δ , які

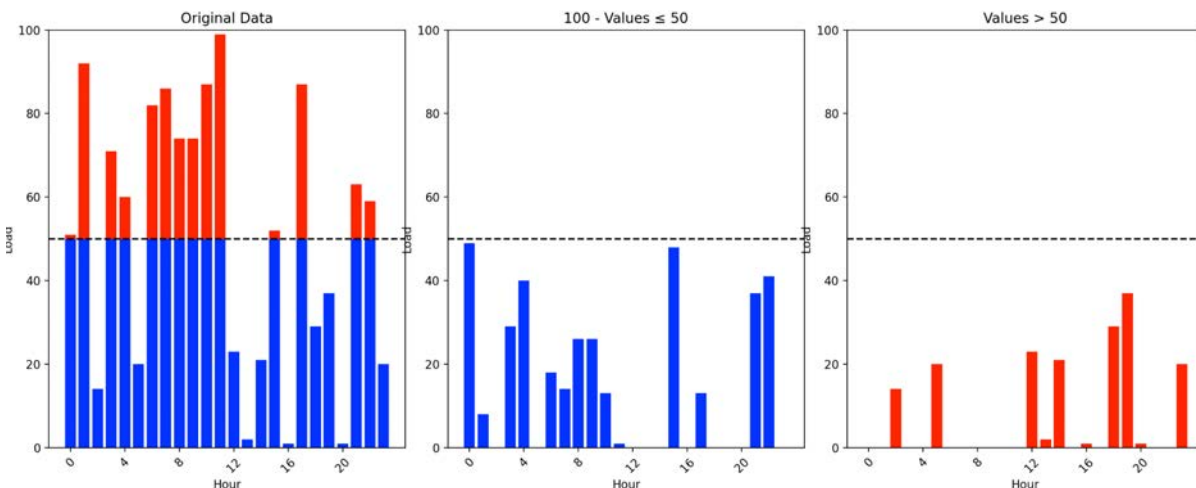


Рис. 2. Поділ високонавантаженого мікросервісу на 2 екземпляри

можуть відбуватися щодня. Цей параметр надається разом з початковими метриками. Алгоритм працює для всіх критеріїв однаково, тому формули і приклади написані без уточнення, для якої саме характеристики вони взяті. Поділ має відбуватися, якщо характеристика перевищує :

$$P_{\text{chunk}} = P_{\text{tmin}} + \Delta P_{\text{tmin}} + \delta < P_{\text{boundary}} \quad (2)$$

де

P_{chunk} – поріг для початку поділу.

– момент з мінімальним значенням для певної характеристики.

Δ – відсоток збільшення, необхідний для поділу.

– максимальне порогове значення.

Наприклад, якщо $\Delta = 30\%$, $\delta = 5\%$, $P_{\text{tmin}} = 10$ і $P_{\text{boundary}} = 20$. Підставивши значення у формулу, отримаємо наступне:

$$P_{\text{chunk}} = 10 + 0.30 \times 10 + 0.05 \times 10 = 10 + 3 + 0.5 = 13.5$$

Оскільки 13,5 менше граничного значення 20, то мікропослуга повинна бути розділена, якщо характеристика перевищує 13,5 одиниць. Це гарантує, що мікросервіси ефективно розділяються тільки тоді, коли це необхідно, оптимізуючи використання ресурсів у хмарному середовищі. Поділ все одно відбуватиметься за граничним значенням, а не за Δ ідсотків.

Для визначення кількості частин, на які слід розділити мікросервіс, ми використовуємо формулу (3). Ця формула враховує суму максимального навантаження P_{max} та невеликий відсоток для врахування добових коливань δ , ділить цю суму на граничне значення P_{boundary} та округляє до найближчого цілого числа, яке позначено функцією «підлога-стеля».

$$m = \left\lfloor \frac{P_{\text{max}} + \delta}{P_{\text{boundary}}} \right\rfloor \quad (3)$$

Отримане в результаті останнє навантаження на мікропроцесор може виявитися занадто малим і ним можна знехтувати. Критерії повинні бути специфічними для хмарних та інших обчислень. Ми пропонуємо не створювати останній блок, якщо залишок не перевищує δ . Цей параметр буде використано в інших формулах і його слід враховувати при підрахунку загального навантаження групи. У формулах це виглядає наступним чином:

$$\text{якщо} \left(\left\lfloor \frac{P_{\text{max}} + \delta}{P_{\text{boundary}}} \right\rfloor - \frac{P_{\text{max}} + \delta}{P_{\text{boundary}}} \right) \leq \delta,$$

$$\text{то } m = \left\lfloor \frac{P_{\text{max}} + \delta}{P_{\text{boundary}}} \right\rfloor$$

$$\text{інакше } m = \left\lfloor \frac{P_{\text{max}} + \delta}{P_{\text{boundary}}} \right\rfloor \quad (4)$$

Якщо $P_{\text{max}} \in 50$, $\delta \in 8\%$ або 0,08, що становить $50 * 0,08 = 4$, і $P_{\text{boundary}} \in 20$, результати застосування (3) і (4) розраховуються наступним чином:

$$m = \left\lfloor \frac{50 + 4}{20} \right\rfloor = \left\lfloor \frac{54}{20} \right\rfloor = \lfloor 2.7 \rfloor$$

якщо $3 - 2.7 = 0.7$ значення < 0.08 , то округляємо в більшу сторону $\lfloor = 3$.

Мікросервіси та Sidecars

Мікросервіси зазвичай запускаються в контейнерах з використанням оркестраційних фреймворків, таких як Kubernetes. Якщо мікросервіси є частинами розподіленого монолітного сервісу, то системи контейнерної оркестрації йдуть далі, дозволяючи кожному мікросервісу розмішуватися в кількох контейнерах. Наприклад, один контейнер може містити бізнес-логіку додатку, а інші – виконувати функції моніторингу або балансування навантаження. Такі додаткові контейнери часто називають "sidecars", оскільки вони розгортаються поруч із основним контейнером і обробляють вхідні або вихідні запити. Група контейнерів, що включає як основні, так і допоміжні контейнери, які разом утворюють логічний сервіс, об'єднується в єдиний простір імен, відомий як "pod" у Kubernetes.

Оскільки кожен "pod" може бути реплікований для масштабування мікросервісів, для маршрутизації запитів до відповідних вузлів потрібні балансувальники навантаження. Можливість легко інтегрувати функціональні компоненти дозволила замінити централізовані балансувальники навантаження розподіленими балансувальниками "sidecar", які розгортаються разом із кожним "pod". Кожен "прокси-sidecar" відповідає за балансування вихідних запитів мікросервісу через кілька реплік у ланцюжку. Це робить систему більш масштабованою, хоча і без глобального огляду, як у централізованих рішеннях.

Групування на основі алгоритмів кластеризації KMeans та DBSCAN

Ефективне управління ресурсами в хмарних обчисленнях передбачає кілька етапів підготовки мікросервісів, групування на основі моделей використання ресурсів, а також пошук взаємодоповнюючих мікросервісів всередині цих груп. Коли група сформована, її можна розгортати. Такий підхід підвищує продуктивність та ефективність використання ресурсів. Крім того, поєднання в групі основних мікросервісів та "sidecars", дозволить більш ефективно організувати завантаженість подів оркестратора (Kubernetes' pods).

Для групування мікросервісів за схожою поведінкою можна використовувати алгоритми клас-

теризації, такі як KMeans і DBSCAN (Density-Based Spatial Clustering of Applications with Noise). Об'єкти в одній групі, яка називається кластером, більш схожі один на одного, ніж на об'єкти в інших групах. KMeans і DBSCAN – це два широко використовувані алгоритми кластеризації, кожен з яких має свої особливості. У цьому розділі наведено детальне порівняння цих двох методів, зосереджено увагу на їхніх основних принципах, перевагах, обмеженнях та випадках використання.

Алгоритм DBSCAN ідентифікує кластери на основі щільності точок. Він може знаходити кластери довільної форми і може працювати з шумом. У цьому завданні очікується, що точки даних утворюють переважно кругові кластери, тому кластеризація за методом K-середніх виявляється більш підходящим вибором, ніж DBSCAN. Нижче описано алгоритми і показано, чому K-Means краще підходить для цього сценарію:

1. Очікується, що точки даних мають радіус кола. K-середнє краще виявляє сферичні або кругові кластери, що добре узгоджується з нашим очікуваним розподілом даних. DBSCAN, хоча і здатний виявляти кластери довільної форми, може надмірно ускладнити аналіз для наших круглих кластерів.

2. Для подальшого пошуку компліментів потрібні центроїдні точки як база, для якої шукатимуться компліменти. K-Means видає явні центроїди кластерів, що є цінним.

3. Обробка контурів не передбачається, оскільки вони мають бути відфільтровані на попередньому етапі. Здатність DBSCAN ідентифікувати точки шуму може бути корисною в деяких сценаріях, однак, завдання вимагає включення точок контуру до кластерів, як вони є. K-Means природним чином об'єднує всі точки в кластери, що є корисним, оскільки контури не слід розглядати як шум. Цей крок попередньої обробки підвищує ефективність K-Means для нашої задачі.

4. Під час ініціалізації нової компліментарної структури, згідно з ідеєю, описаною в статті, може виникнути потреба в обробці великої кількості мікросервісів. Саме тому обчислювальна ефективність є важливим моментом, який слід враховувати. K-Means зазвичай пропонує кращу масштабованість для великих наборів даних. У сценаріях, де швидкість обробки має вирішальне значення, K-Means може забезпечити швидші результати, особливо якщо кількість кластерів відома або може бути оцінена.

KMeans кластеризує дані в групи, мінімізуючи дисперсію всередині кожного кластера. Цільова функція полягає в тому, щоб знайти аргумент – центроїд, при якому функція відстані до точки матиме мінімальне значення. Іншими словами, найближчий центроїд повинен притягувати точку до свого кластера:

$$\arg \min_S \sum_{i=1}^k \sum_{x \in S_i} \|x - \mu_i\|^2 \quad (5)$$

де

S – множина кластерів.

μ_i – центроїд кластера.

Алгоритм ітераційно оновлює центроїди і перепризначає точки до найближчих центроїдів до збіжності.

Існує також інший метод, який можна розглянути – косинусна подібність. Він вимірює косинус кута між двома векторами $\cos(\theta)$, показуючи, наскільки вони схожі, незалежно від величини. Цей метод працював би добре, якби вектори були багатовимірними в реальності. Вектори в задачі насправді є часовими рядами. Ангели в різних частинах одного часового ряду є суперечливими. Метод косинусоїдальної подібності працює скоріше з лінією, а не з кривою, тому не підходить у цьому випадку.

Приклад групування

Щоб зробити приклад наближеним до реального, для кожного типу з п'яти поведінок було згенеровано 24 мікросервіси, які виконують одна одну. Поведінки з кількістю згенерованих мікропроцесорів представлені нижче:

– 2 мікросервіси зі стабільним навантаженням для.

4 мікросервіси з піковим навантаженням в робочий час (з 9:00 до 17:00).

2 мікросервіси з піковим навантаженням після опівночі та до 6 ранку.

2 мікросервіси з піковим навантаженням з 17:00 до ночі.

2 мікросервіси з випадковими піками.

– Доповнення для кожного з цих патернів (навантаження в протилежний час).

Кластеризація за допомогою алгоритму KMeans. Аналіз головних компонент (PCA) був використаний для векторів і центроїдів, щоб зробити зображення чітким і зрозумілим [4]. Алгоритм використовується лише для графічного представлення для кращого розуміння якості роботи алгоритму KMeans, тому в роботі він не описується. Більш детальну інформацію про нього можна знайти тут [5], [6]. Він зводить 24-вимірні дані до 2-вимірних, що дозволяє візуалізувати багатовимірні дані у вигляді двовимір-

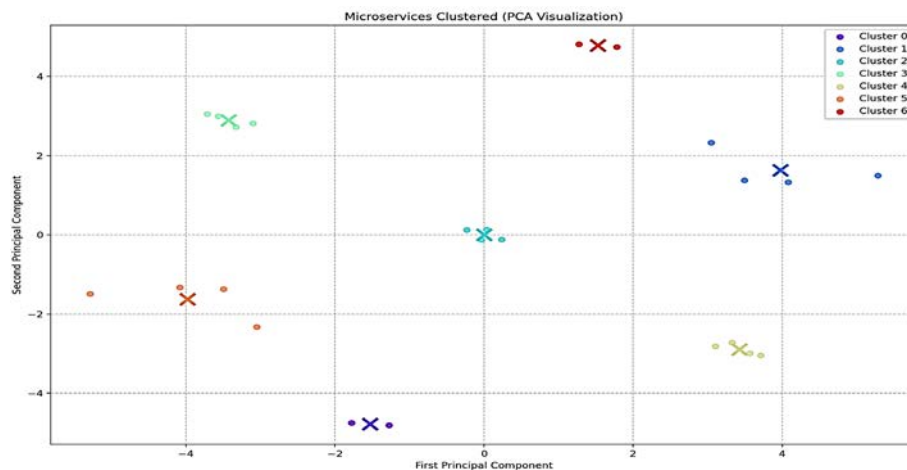


Рис. 3. 2D векторно-центроїдна візуалізація за алгоритмом KMeans після аналізу головних компонент. X – центроїди, точки – 24-D вектори, перетворені в 2-D вектори за допомогою PCA. Колір вказує на приналежність до певних центроїдів

ного графіка. Проте, слід зазначити, що частина інформації неминуче втрачається в процесі зменшення розмірності.

На діаграмі розсіювання на рисунку 3 кожна точка представляє мікропослугу. Центроїди позначені великими маркерами «X». Точки одного кольору утворюють кластер. Координати x та y у кожній точці є першою та другою головними компонентами відповідно. Така візуалізація дозволяє спостерігати, наскільки добре розділені кластери і чи є в даних якісь чіткі угруповання.

Висновки. У статті було запропоновано та досліджено методи організації та групування мікросервісів у серверні групи Kubernetes. Основні результати роботи полягають у наступному:

1. Ефективне використання ресурсів: Запропонований підхід з декомпозицією мікросервісів дозволяє ефективно управляти високонавантаженими компонентами системи, оптимізуючи їх розподіл між серверами. Це підвищує загальну продуктивність системи та зменшує ризики перевантаження окремих ресурсів.

2. Декомпозиція мікросервісів: Процедура поділу мікросервісів з високими вимогами до ресурсів на менші компоненти дозволяє краще розподілити навантаження в середовищі Kubernetes. Це забезпечує більш гнучке управління ресурсами під час пікових навантажень.

3. Балансування навантаження: Використання алгоритмів балансування, таких як “sidecar”, дозволяє більш рівномірно розподіляти запити між мікросервісами, що зменшує ймовірність виникнення «точок відмови» та покращує надійність системи.

4. Застосування алгоритмів кластеризації: Алгоритми кластеризації, такі як KMeans і DBSCAN, допомагають ефективно групувати мікросервіси за їхньою поведінкою, що дозволяє краще адаптуватися до різних сценаріїв використання ресурсів і підвищити ефективність роботи системи.

Таким чином, запропоновані методи та алгоритми підвищують гнучкість і масштабованість систем на основі мікросервісів у хмарному середовищі Kubernetes, забезпечуючи стабільну та ефективну роботу навіть при змінних навантаженнях.

Список літератури:

1. O. Al-Debagy and P. Martinek, “A Comparative Review of Microservices and Monolithic Architectures,” in *2018 IEEE 18th International Symposium on Computational Intelligence and Informatics (CINTI)*, Nov. 2018, pp. 000149–000154. doi: 10.1109/CINTI.2018.8928192.
2. O. Dmytrenko and M. Skulysh, “Determining microprocessor groups for efficient utilization of processor capacities” *Problems of programing Forthcom.*, vol. 1, no. №2-3, Aug. 2024, [Online]. Available: https://docs.google.com/document/d/1ocqA-e7d-OAibFVGiEE2UcxZRKgYNn_yPX6e94dHwYM/edit?usp=sharing
3. O. Dmytrenko and M. Skulysh, “Fault Tolerance Redundancy Methods for IoT Devices,” *Infocommunication Comput. Technol.*, vol. 2(04), no. University “Ukraine,” pp. 59–65, Dec. 2022.
4. I. T. Jolliffe, Ed., “Graphical Representation of Data Using Principal Components,” in *Principal Component Analysis*, New York, NY: Springer, 2002, pp. 78–110. doi: 10.1007/0-387-22440-8_5.

5. I. T. Jolliffe, Ed., "Principal Components as a Small Number of Interpretable Variables: Some Examples," in *Principal Component Analysis*, New York, NY: Springer, 2002, pp. 63–77. doi: 10.1007/0-387-22440-8_4.
6. I. T. Jolliffe, Ed., "Choosing a Subset of Principal Components or Variables," in *Principal Component Analysis*, New York, NY: Springer, 2002, pp. 111–149. doi: 10.1007/0-387-22440-8_6.
7. O. Dmytrenko and M. Skulysh, "Method of Grouping Complementary Microservices Using Fuzzy Lattice Theory," vol. 12, no. 1, pp. 11–18, Mar. 2024, doi: 10.25673/115636.
8. M. Skulysh and S. Sulima, "Management of multiple stage queuing systems," *The Experience of Designing and Application of CAD Systems in Microelectronics*, Lviv, Ukraine, 2015, pp. 431–433, doi: 10.1109/CADSM.2015.7230895.

Skulysh M.A., Dmytrenko O.A. A METHOD OF ORGANISATION OF MICROSERVICES ON KUBERNETES SERVER GROUPS

The article discusses modern methods for optimizing the distribution of computing resources in cloud environments through the organization of microservices. The main focus is on the decomposition of monolithic applications and resource-intensive microservices, which helps to improve the efficiency of server capacity utilization. The authors propose a method for clustering microservices using KMeans and DBSCAN algorithms, which enables more effective grouping of services based on their behavior and load. This allows for optimizing the load balancing process and ensuring a more stable system operation during peak loads. In particular, the article explores how the proposed approach can be applied in container orchestrators like Kubernetes to manage microservices. The authors describe the concept of using "sidecar" load balancers deployed next to each microservice container for request routing. This approach avoids a "single point of failure" and ensures a more even distribution of requests between nodes. Special attention is given to energy efficiency and optimal resource utilization. The article discusses methods for splitting resource-intensive microservices into smaller components, allowing for more flexible system management under changing loads. Such decomposition reduces the risk of system overload and increases its overall performance. This work is essential for ensuring the stability of modern cloud systems, especially in the context of the rapid development of microservice architecture and containerization technologies.

Key words: *Microservice augmentation, cloud computing, microservice clustering, energy efficiency, optimal resource utilisation, Kubernetes.*

Слабінога М.О.

Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу

Бойчук Т.В.

Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу

АВТОМАТИЗОВАНА СИСТЕМА ОБЛІКУ КОМП'ЮТЕРНОЇ ТЕХНІКИ УНІВЕРСИТЕТУ ЯК СКЛADOVA ЄДИНОЇ УНІВЕРСИТЕТСЬКОЇ ІНФОРМАЦІЙНОЇ СИСТЕМИ

Стаття присвячена актуальній науково-технічній проблемі обліку комп'ютерної техніки в університетах. Це завдання є важливим для ефективного управління технічними ресурсами, оскільки воно забезпечує відповідність наявної техніки потребам навчального процесу та наукової діяльності. В умовах швидкого розвитку технологій застаріле обладнання може перешкоджати ефективній роботі студентів і викладачів, а також негативно впливати на якість науково-дослідної діяльності. Таким чином, правильний облік і керування технікою сприяють підвищенню продуктивності та загальної ефективності освітнього процесу.

У статті також обґрунтовано, що облік комп'ютерної техніки є специфічною задачею, відмінною від стандартного матеріального обліку, оскільки обслуговування, ремонт і утилізація техніки зазвичай здійснюються окремими підрозділами університету. Це підкреслює важливість точного збору та обробки даних про технічний стан обладнання для виявлення та аналізу причин поломок, прогнозування оновлення техніки та вдосконалення процесів обслуговування. Окрім прикладного значення, облік комп'ютерної техніки також має науковий аспект, зокрема щодо підвищення надійності компонентів локальної мережі та дослідження процесів зносу обладнання з використанням алгоритмів прогнозування.

Автори наводять приклад розробки модуля обліку комп'ютерної техніки для Івано-Франківського національного технічного університету нафти і газу. Цей модуль є частиною єдиної інформаційної системи університету і реалізований у вигляді веб-додатка з використанням сучасних технологій. Описано структуру модуля, його функціональні можливості та приклади взаємодії з API для автоматизації обліку комп'ютерної техніки, що дозволяє зменшити вплив людського фактору та прискорити процес збору даних. Стаття також містить огляд майбутніх напрямків розвитку цієї системи, зокрема планується інтеграція модуля з фізичними інвентарними номерами техніки та впровадження обліку периферійних пристроїв для покращення управління технічними ресурсами.

Ключові слова: облік комп'ютерної техніки, інформаційна система, автоматизований облік, API, клієнт-серверна архітектура.

Постановка проблеми. Задача обліку комп'ютерної техніки в університеті є ключовою науково-технічною задачею, оскільки дозволяє ефективно управляти ресурсами й забезпечувати їхню відповідність потребам навчального процесу та дослідницької діяльності. Регулярний облік дозволяє точно відстежувати кількість та стан наявної техніки, планувати оновлення обладнання та прогнозувати витрати на підтримку. Це особливо важливо в умовах швидкого розвитку технологій, де застаріле обладнання може створювати додаткові труднощі для викладачів і студентів, а також знижувати ефективність наукової діяльності.

Для технічної підтримки університету, що здійснюється центрами інформаційних технологій,

або інформаційно-обчислювальними центрами, облік комп'ютерної техніки також є важливим інструментом планування та організації роботи. Завдяки точній інформації про розташування, технічні характеристики та терміни експлуатації техніки, технічні спеціалісти можуть оптимізувати обслуговування, знижувати час на ремонт і покращувати продуктивність систем. Крім того, це сприяє мінімізації ризиків простою техніки під час занять та дослідницьких проєктів, що позитивно впливає на якість освіти та досліджень.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Облік комп'ютерної техніки є дещо специфічним, порівняно із типовим матеріальним обліком, оскільки як правило, керування, обслуговування,

ремонт та утилізація комп'ютерної техніки здійснюється окремим підрозділом, на відміну від інших матеріальних цінностей. Тому для відповідних організаційних підрозділів, що здійснюють підтримку, супровід та ремонт комп'ютерної техніки в установі, важливо облікувати інформацію про старіння фонду комп'ютерної техніки, неполадки, тощо, щоб виділяти та аналізувати причини неполадок, прогнозувати оновлення, тощо.

Ринок програмного забезпечення пропонує ряд продуктів для організації обліку комп'ютерної техніки, такі як Network Inventory Advisor, Lansweeper, Spiceworks IT Asset Management, Asset Panda, WinAudit [1].

При цьому, дана задача є не тільки прикладною, а й науковою, оскільки правильне керування обліком комп'ютерної техніки дає можливість підвищити надійність компонентів локальної мережі в цілому [2], а також дослідити знос комп'ютерної техніки з використанням алгоритмів прогнозування [3, 4]. Також, слід зазначити, що велика частина публікацій пов'язана з подальшим опрацюванням даних, зібраних в системі обліку та побудови прогностичних моделей з метою прогнозування зносу та плану оновлення техніки [5–7].

При цьому, як правило, подібні системи є більш орієнтованими на інтеграцію із системами обліку матеріальних активів та бухгалтерського обліку, що є природнім. Однак у контексті вищої освіти, доцільним завданням є також інтеграція системи обліку комп'ютерної техніки з системою керування процесами в закладі вищої освіти, адже забезпечення обладнанням та комп'ютерною технікою є одним із критеріїв забезпечення провадження освітньої діяльності, а тому повинне відображатися відповідним чином в звітах самооцінювання освітніх програм. Тому прив'язка обліку комп'ютерної техніки до приміщень, в якій вона розміщена, та підрозділів, за якими закріплені дані приміщення, є важливою прикладною задачею.

Постановка завдання. Метою статті є розробка модуля обліку комп'ютерної техніки з прив'язкою до приміщень, за якими вона закріплена, як частини єдиної інформаційної системи університету.

Виклад основного матеріалу. Проектована єдина інформаційна система Івано-Франківського національного технічного університету нафти і газу складається з ряду модулів, один із яких – модуль обліку комп'ютерної техніки, а саме – системних блоків. Система реалізується у вигляді веб-орієнтованого програмного забезпечення, де

клієнтська частина реалізується на технології React з використанням графічного фреймворку Ant Design, мінімізується використання сторонніх плагінів і технологій, а для стилів використовується звичайний CSS (мотивація відмови від препроцесорів – зниження порогу входу в проєкт, адже до розробки залучаються студенти). Серверна частина реалізується мовою програмування PHP у вигляді API з авторизацією через Bearer-токен.

Діаграма сутностей та зв'язків модуля обліку комп'ютерної техніки подана на рис. 1.

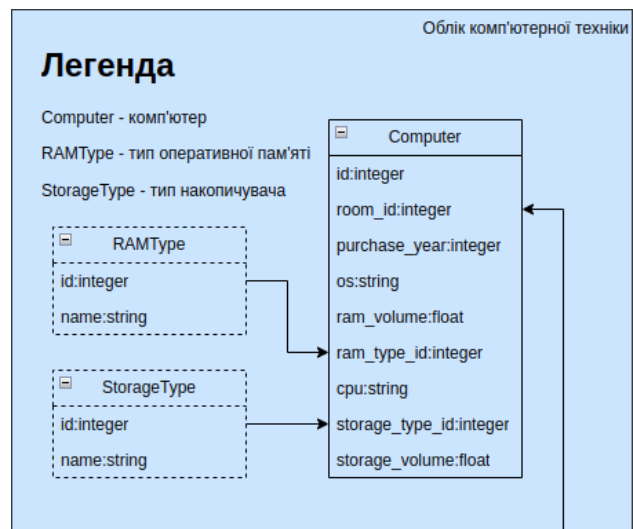


Рис. 1. Діаграма сутностей та зв'язків модуля обліку комп'ютерної техніки

Головна сторінка модуля «Комп'ютери» містить:

- велику кнопку «Комп'ютери», «Додати Комп'ютер»;
- малі кнопки «Типи оперативної пам'яті» та «Типи накопичувачів»;

Сторінка «Комп'ютери» містить таблицю з наступними полями:

- id запису;
- приміщення;
- обсяг оперативної пам'яті;
- процесор;
- обсяг диска;
- операційна система;
- рік придбання.

Сторінка додавання/редагування комп'ютера містить форму з наступними полями:

- приміщення (випадаючий список з автозаповненням (приміщення), обов'язкове);
- рік придбання (число, обов'язкове);
- операційна система (текстове, обов'язкове);
- процесор (текстове, обов'язкове);

- обсяг оперативної пам'яті, Гб (число, обов'язкове);

- тип оперативної пам'яті (випадаючий список, обов'язковий);

- обсяг накопичувача, Гб (число, обов'язкове);
- тип накопичувача (випадаючий список, обов'язковий);

Сторінка «Список оперативної пам'яті» містить таблицю з наступними полями:

- id запису;
- Назва типу;
- поле «Ді» з кнопками «Редагувати/Видалити».

Приклади типів: DDR2,DDR3,DDR4.

Сторінка додавання/редагування типу оперативної пам'яті містить форму з наступними полями:

- назва типу оперативної пам'яті (текстове, обов'язкове).

Сторінка «Список типів накопичувачів» містить таблицю з наступними полями:

- id запису;
- Назва типу;
- поле «Дії» з кнопками «Редагувати/Видалити»;

Приклади типів: SSD, HDD, Flash.

Сторінка додавання/редагування типу накопичувачів містить форму з наступними полями:

- назва типу накопичувачів (текстове, обов'язкове).

Робота з API здійснюється через ряд сутностей та запитів до них. Для сутності «Комп'ютер» передбачені наступні запити:

GET {{apiUrl}}/computers – отримати всі комп'ютери

GET {{apiUrl}}/computers?id=1 – отримати комп'ютер за ID

DELETE {{apiUrl}}/computers?id=5 – видалити комп'ютер за ID

POST {{apiUrl}}/computers – додати комп'ютер

PUT {{apiUrl}}/computers – редагувати комп'ютер за ID

Приклад JSON-об'єкта «Комп'ютер»:

```
{
  "id": "1", //id об'єкта, ціле число
  "room_id": "1", //id приміщення, зовнішній ключ, ціле число
  "purchase_year": "2020", // рік придбання комп'ютера, рядок
  "os": "Ubuntu 20.04", //операційна система, рядок
  "ram_volume": "4", //об'єм оперативної пам'яті, число

```

```
"ram_type_id": "4", //id типу оперативної пам'яті (зовнішній ключ), ціле число

```

```
"cpu": "Intel Core i5", //процесор, рядок

```

```
"storage_type_id": "1", //id типу накопичувача, ціле число

```

```
"storage_volume": "120", // об'єм накопичувача, число

```

Додатково, для get-запитів підтягуються

```
"room_name": "01", //назва приміщення

```

```
"storage_type_name": "HDD", //назва типу накопичувача

```

```
"ram_type_name": "DDR4" //назва типу оперативної пам'яті

```

```
}
```

Для сутності «Тип оперативної пам'яті» передбачені наступні запити:

GET {{apiUrl}}/pc-ram-types – отримати всі типи

GET {{apiUrl}}/pc-ram-types?id=1 – отримати тип за ID

DELETE {{apiUrl}}/pc-ram-types?id=5 – видалити тип за ID

POST {{apiUrl}}/pc-ram-types – додати тип

PUT {{apiUrl}}/pc-ram-types – редагувати тип за ID

Приклад JSON-об'єкта «Тип оперативної пам'яті»:

```
{

```

```
"id": "1", //id типу ОП (ціле число)

```

```
"type": "DDR1" //назва типу ОП (рядок)

```

```
}
```

Для сутності «Тип накопичувача» передбачені наступні запити:

GET {{apiUrl}}/pc-storage-types – отримати всі типи

GET {{apiUrl}}/pc-storage-types?id=1 – отримати тип за ID

DELETE {{apiUrl}}/pc-storage-types?id=5 – видалити тип за ID

POST {{apiUrl}}/pc-storage-types – додати тип

PUT {{apiUrl}}/pc-storage-types – редагувати тип за ID

Приклад JSON-об'єкта «Тип накопичувача»:

```
{

```

```
"id": "1", //id типу накопичувачів (ціле число)

```

```
"type": "HDD" //назва типу накопичувачів (рядок)

```

```
}
```

Проектована система дає можливість здійснювати облік системних блоків в приміщеннях університету та слідкувати за технічним станом та оновленням комп'ютерної техніки. Однак, руч-



Рис. 2. Загальна схема компонент системи

ний режим введення є доволі трудомістким і не виключає людський фактор. У зв'язку з цим, було прийняте рішення щодо створення невеликої прикладної програми, яка б виконувала дану задачу автоматизовано. Програма виконана у вигляді .exe-файлу для OS Windows та скрипта Python на Linux. Користувачам пропонується запуснути програму на комп'ютері, ввести номер аудиторії, після чого програма або скрипт автоматично передадуть інформацію про даний комп'ютер на сервер. Для отримання параметрів програми використовується системний виклик команди systeminfo (для Windows) та бібліотеки os та psutil (для скрипта на Python для Linux). Це дає змогу не вводити інформацію централізовано, а вибравши тільки номер приміщення, автоматизовано передати дані на сервер. Загальна схема компонент системи подана на рис. 2.

Висновки. Практична цінність даної розробки полягає в автоматизації процесу обліку

комп'ютерної техніки з можливістю відслідковувати потребу підрозділів у модернізації, заміні та закупівлі комп'ютерної техніки. Запропонований підхід дозволяє легко інтегрувати модуль обліку комп'ютерної техніки у загальну інформаційну систему, зокрема інтегрувати модуль «Приміщення» для вибору потрібного кабінету, тощо.

В подальшій перспективі планується синхронізувати сформовану базу знань з фізичними інвентарними номерами комп'ютерів та вести облік неполадок, ремонту та обслуговування техніки, що дасть змогу детальніше досліджувати даний процес. Також, планується допрацювати модуль з можливістю облікувати периферійні пристрої вводу та виводу.

Подяка. Автори хочуть подякувати Збройним Силам України та всім захисникам України за можливість продовжувати наукову та технічну діяльність під час війни.

Список літератури:

1. Best 5 computer inventory software solutions. Network Inventory Advisor. (25.09.2024). <https://www.network-inventory-advisor.com/best-computer-inventory-software.html>
2. Souza, Gilberto & Netto, Adherbal & Melani, Arthur & Michalski, Miguel & da Silva, Renan. (2021). Reliability Analysis and Asset Management of Engineering Systems. 10.1016/C2020-0-00478-0.
3. Pirayonesi, s. Madeh & El-Diraby, Tamer. (2020). Role of Data Analytics in Infrastructure Asset Management: Overcoming Data Size and Quality Problems. Journal of Transportation Engineering, Part B: Pavements. 146. 04020022. 10.1061/JPEODX.0000175.
4. M. Marinescu et al., "Software system for inventory and assessment of the wear of computing machines from a network of grid data centers," 2014 RoEduNet Conference 13th Edition: Networking in Education and Research Joint Event RENAM 8th Conference, Chisinau, Moldova, 2014, pp. 1-4, doi: 10.1109/RoEduNet-RENAM.2014.6955293.
5. de Paula Vidal, G. H., Caiado, R. G. G., Scavarda, L. F., Ivson, P., & Garza-Reyes, J. A. (2022). Decision support framework for inventory management combining fuzzy multicriteria methods, genetic algorithm, and

artificial neural network. In Computers & Industrial Engineering (Vol. 174, p. 108777). Elsevier BV. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2022.108777>

6. Chenchala, Pradeep & Choppadandi, Ashok & Kaur, Jagbir & Nakra, Varun & Kirupa, Pandi & Pandian, Gopalakrishna & Taqa, Amer. (2020). Predictive Maintenance and Resource Optimization in Inventory Identification Tool Using ML. 8. 3006-2853.

7. Javaregowda, Madhuri & B, praveen & Kumar, Pradyumna & J, Prateek & G, Pragathi. (2020). Inventory management using Machine Learning. International Journal of Engineering and Technical Research. 9.

Slabinoha M.O., Boichuk T.V. AUTOMATED SYSTEM OF COMPUTER HARDWARE ASSETS MANAGEMENT AS A PART OF COMPLEX UNIVERSITY INFORMATION SYSTEM

The article is devoted to the current scientific and technical problem of accounting for computer equipment in universities. This task is important for the effective management of technical resources, as it ensures that the available equipment meets the needs of the educational process and scientific activity. In the conditions of rapid development of technologies, outdated equipment can hinder the effective work of students and teachers, as well as negatively affect the quality of research activities. Thus, correct accounting and management of equipment contribute to increasing productivity and overall efficiency of the educational process.

The article also substantiates that accounting for computer equipment is a specific task, different from standard material accounting, since maintenance, repair and disposal of equipment are usually carried out by separate units of the university. This highlights the importance of accurately collecting and processing data on the technical condition of equipment to identify and analyze the causes of breakdowns, predict equipment upgrades, and improve maintenance processes. In addition to the applied value, the accounting of computer equipment also has a scientific aspect, in particular, with regard to improving the reliability of local network components and researching the processes of wear and tear of equipment using forecasting algorithms.

The authors give an example of the development of a computer accounting module for the Ivano-Frankivsk National Technical University of Oil and Gas. This module is part of the university's unified information system and is implemented as a web application using modern technologies. The structure of the module, its functionality and examples of interaction with the API for automating accounting of computer equipment are described, which allows to reduce the impact of the human factor and speed up the data collection process. The article also contains an overview of the future directions of the development of this system, in particular, the integration of the module with the physical inventory numbers of the equipment and the implementation of accounting of peripheral devices to improve the management of technical resources are planned.

Key words: *assets management of computer equipment, information system, automated assets management, API, client-server architecture.*

Стьопкін А.В.

ДВНЗ «Донбаський державний педагогічний університет»

АЛГОРИТМ РОЗПІЗНАВАННЯ ПРОСТИХ НЕОРІЄНТОВАНИХ ГРАФІВ КОЛЕКТИВОМ АГЕНТІВ

Стаття присвячена проблемі розпізнавання неорієнтованих графів без петель та кратних ребер колективом агентів. У статті запропоновано новий алгоритм розпізнавання графів колективом агентів, що складається з двох агентів-дослідників, які мають скінчену пам'ять (об'єм пам'яті агентів не залежить від числа вершин досліджуваного ними графа), і для розпізнавання графу використовують по дві фарби різного кольору кожен (всього три різні фарби) і одного агента-експериментатора, який знаходиться поза межами графу та володіє скінченною, необмежено зростаючої внутрішньою пам'яттю. Агенти-дослідники можуть пересуватися по графу, зчитувати і змінювати мітки елементів графа, а також передавати необхідну інформацію агенту-експериментатору. Агент-експериментатор – це нерухомий агент в пам'яті якого на кожному кроці фіксується результат функціонування агентів-дослідників і поступово вибудовується представлення досліджуваного графа списком ребер і списком вершин.

У статті розкрито режими роботи агентів-дослідників із зазначенням порядку їх активації та детально розглянуто повідомлення, якими обмінюються агенти між собою в процесі роботи. Запропоновано повний алгоритм роботи агента-експериментатора з детальним описом процедур обробки отриманих від агентів-дослідників повідомлень, на підставі яких і відбувається розпізнавання досліджуваного графа (побудова карти графа). Також в статті проведено аналіз часової, ємнісної, комунікаційної складності побудованого алгоритму та проаналізовано кількість переходів по ребрах, які виконують агенти-дослідники.

З'ясовано, що представлений алгоритм розпізнавання графів має квадратичні (від числа вершин досліджуваного графа) часову, ємнісну і комунікаційну складності, а також кількість переходів по ребрах, які виконують агенти-дослідники. Робота запропонованого алгоритму розпізнавання графів ґрунтується на методі обходу графа в глибину.

Ключові слова: розпізнавання графів, прості скінчені графи складність алгоритму, обхід в глибину, колектив агентів.

Постановка проблеми. В наш час досить стрімко розвивається такий напрям кібернетики як робототехніка, яка дозволяє автоматизувати деякі процеси та спростити людині виконання важкої або навіть небезпечної роботи. Беручи до уваги те, що в світі, у зв'язку з недоступністю для людини, наявна велика кількість недосліджених середовищ [1] стає очевидним, що вирішення задачі дослідження середовищ роботами залишається актуальною проблемою [2–4], причому використання колективу агентів [5–7] підвищує ймовірність вирішення поставленої задачі, а можливо навіть покращить час роботи алгоритму.

Аналіз останніх досліджень і публікацій.

Початком досліджень в цьому напрямку прийнято вважати роботу К. Шеннона [8], в якій розглядалася задача пошуку автоматом заданої цілі в лабіринті. Активне вивчення поведінки автоматів в лабіринтах починається після появи роботи К. Демпа [9], який описує обхід шахових лабіринтів скінченими автоматами. Далі в роботі [10]

проводилися дослідження в галузі аналізу властивостей невідомого середовища при різних способах взаємодії автомата з операційним середовищем, а також при різній апріорній інформації про нього.

До вирішення проблеми розпізнавання графів визначено ряд підходів, запропоновано ряд алгоритмів блукання агента по графу і способів позначення елементів графа фарбами або камінням, що дозволяють розпізнати досліджуваний граф з точністю до ізоморфізму. Так, в роботі [11], пропонується метод, в якому агент, при переміщенні, мітить тільки інцидентори (точка з'єднання ребер з вершинами) пройдених ребер. Для розпізнавання ребер агент переходить по ним, потім найкоротшим шляхом повертається в початкову вершину. При цьому запам'ятовує мітки пройдених інциденторів, які однозначно визначають вершину, в яку потрапив агент.

Починаючи з 1993 року публікуються роботи по дослідженню графів роєм агентів [11, 12].

Алгоритм роботи рою полягає в наступному: всі агенти починають роботу з однієї вершини. Домовившись заздалегідь про час наступної зустрічі, агенти ділять доступні ребра між собою і розходяться по ним. Після обходу певної частини графа агенти повертаються у вихідну вершину для об'єднання отриманих карт. Далі вони домовляються про наступну зустріч і знову розходяться і так триває до повного розпізнавання графа. Аналогічні алгоритми з використанням рою агентів розглядалися в роботах [5] і [6]. А ось, наприклад, в роботі [13] використовується колектив агентів, які починають роботу з різних вершин графа і взаємодіють між собою за допомогою токенів, що записуються в вершини графа.

В роботі [4] пропонується децентралізований підхід до дослідження графів колективом агентів, в якому агенти можуть уникати зіткнень, не маючи між собою прямого зв'язку (обмін інформацією між роботами відбувається за допомогою міток, встановлених в раніше відвіданих вершинах графа). Варто відзначити, що в цьому алгоритмі прийняття рішень лежить безпосередньо на кожному агенті і не залежить від дій інших агентів.

А ось, наприклад, в роботі [2] агенти обмінюються інформацією про виконану роботу з базовою станцією через спеціальну мережу. Ця мережа має деякі обмеження щодо обміну даними. Тобто для координації дій між агентами потрібно спочатку сформувати мережу, що задовольняє певним умовам. Особливість дослідження – асинхронні стратегії, що працюють з довільними моделями комунікації.

У статті [3] зроблено спробу розробки загальних концепцій і вимог для дослідження графів колективами агентів. Запропоноване представлення мультиагентної системи, спрямоване на надання загальних умов для оголошення завершення дослідження графа і завершення такого дослідження за скінчений час.

Постановка завдання. У відомих роботах мало уваги приділено дослідженню обміну інформацією між агентами, а також його складності і можливого впливу на часову та ємнісну складності. Це робить актуальними дослідження експериментів по розпізнаванню графа колективом агентів, а також завдання, спрямовані на пошук методів оптимізації витрат ресурсів та часу, а також навантаження на канал зв'язку при розпізнаванні графів.

Мета роботи – створення ефективного методу і побудова відповідного алгоритму розпізнавання невідомих простих графів за допомогою колек-

тиву агентів [7, 14–15], а також дослідження часової, ємнісної та комунікаційної складностей побудованого алгоритму.

Виклад основного матеріалу. В роботі розглядаються скінчені, неорієнтовані, прості графи. Нехай $G = (V, E)$ – граф, у якого V – множина вершин, E – множина ребер (двоелементних підмножин (v, u) , де $u, v \in V$). Трійку $((v, u), u)$ будемо називати інцидентором (точкою дотику) ребра (v, u) та вершини u . Множину таких трійок позначимо I . Множину $L = V \cup E \cup I$ назвемо множиною елементів графа G . Функцією розфарбування графа G назвемо сюр'єктивне відображення $\mu : L \rightarrow \{w, r, y, ry, b\}$, де w – білий колір, r – червоний, y – жовтий, ry – червоно-жовтий а b – чорний. Пара (G, μ) називається розфарбованим графом. Послідовність u_1, u_2, \dots, u_k попарно суміжних вершин називається шляхом в графі G , а k – довжиною шляху. За умови $u_1 = u_k$ шлях називається циклом. Околом $Q(v)$ вершини v будемо називати множину елементів графа, що складається з вершини v , всіх вершин u суміжних з v , всіх ребер (v, u) та всіх інциденторів $((v, u), v), ((v, u), u)$. Потужність множин вершин V і ребер E позначимо через n і m відповідно. Зрозуміло, що $m \leq \frac{n(n-1)}{2}$. Ізоморфізмом графа G і графа H назвемо таку бієкцію: $\phi : V_G \rightarrow V_H$, що $(v, u) \in E_G$ тоді й тільки тоді, коли $(\phi(v), \phi(u)) \in E_H$. Таким чином, ізоморфні графи рівні з точністю до позначення вершин і розфарбування їх елементів.

Колектив агентів складається з агентів двох типів:

- агент-дослідник (АД) – це агент, який може переміщуватися по скінченому графу, в процесі роботи може фарбувати вершини, ребра і інцидентори графа, а також сприймати ці позначки, також АД може відправляти повідомлення агенту-експериментатору;

- агент-експериментатор (АЕ) – це нерухомий агент, який в процесі роботи може передавати, приймати і ідентифікувати повідомлення АД, володіє скінченою, необмежено зростаючої внутрішньою пам'яттю, в якій фіксується результат функціонування АД на кожному кроці, і, крім того, поступово вибудовується представлення графа списками ребер і вершин.

На початку роботи АД A та B розміщуються в довільні неспівпадаючі вершини графа G . Агенти йдуть «в глибину», поки це можливо, повертаються назад, шукають інший шлях з ще не відвіданими вершинами та не пройденими ребрами. У випадку знаходження суміжної вершини, яка має «чужий» колір, агент мітить всі

перешийки (ребра, що з'єднують підграфи, які розпізнаються різними АД) з поточної вершини в чужу область і сповіщає іншого АД, через АЕ, про необхідність розпізнавання помічених перешийків. Поки другий АД розпізнає перешийки, перший АД не може мітити нові перешийки. У випадку відсутності інших можливих варіантів руху, крім як помітити новий перешийок, перший АД зупиняється до того моменту, поки другий АД не розпізнає всі помічені перешийки. При переході в білі вершини графа АД A і B фарбують його елементи в червоний та жовтий кольори відповідно. При русі «в глибину» червоний (жовтий) шлях подовжується, при русі назад зменшується. При русі АД назад, для розпізнавання зворотних ребер або перешийків, довжина шляху не змінюється. Вершина, з якої можливий лише рух назад по своєму шляху, або зовсім відсутні варіанти переміщення, забарвлюється в чорний колір. Таким чином формуються червоний і жовтий шляхи кожного з агентів. Алгоритм закінчує роботу, коли червоний і жовтий шляху стають порожніми, а всі вершини чорними. Виконуючи обхід графа агенти створюють неявну нумерацію відвіданих вершин. Перший раз відвідавши вершину агент A фарбує її в червоний колір (агент B – в жовтий) та АЕ ставить їй у відповідність номер, рівний значенню змінної Ct_A (Ct_B для агента B). Зазначимо, що змінні Ct_A і Ct_B зберігаються та оброблюються АЕ і можуть приймати лише непарні або парні значення відповідно. Розпізнавання графу G відбувається на основі створеної агентами нумерації шляхом побудови графа H ізоморфного G .

Далі розглянемо режими в яких можуть функціонувати АД. При описі режимів, в дужках вказуються повідомлення, що відправляються АД у відповідній ситуації із зазначенням агента, який відправляє повідомлення («Message_A»; «Message_B»).

1. *Звичайний режим роботи.* Працюючи в цьому режимі, АД рухається по вершинах, пофарбованих у білий колір, фарбуючи ці вершини, ребра, що їх з'єднують та дальні інцидентори в «свій» колір («Forward_A»; «Forward_B»). Якщо білі вершини і інші можливі шляхи переміщення відсутні, то АД повертається назад по своєму шляху, фарбуючи пройдені вершини, ребра, що їх з'єднують і ближні інцидентори в чорний колір («Back_A»; «Back_B»). АД завершує роботу тоді, коли його вихідна вершина забарвлюється в чорний колір («Stop_A», «Stop_B»).

2. *Режим розпізнавання зворотних ребер.* Якщо, при русі вперед, в вершині було виявлено біле ребро,

у якого дальня вершина пофарбована в «свій» колір (зворотне ребро), то АД перемикається в режим розпізнавання зворотних ребер і фарбує в «свій» колір ближні інцидентори всіх зворотних ребер, інцидентних поточній вершині («Mark_BE_A»; «Mark_BE_B»). Завершивши фарбування інциденторів, АД рухається назад по своєму шляху на кожному кроці відправляючи повідомлення («Stepback_A»; «Stepback_B»), до виявлення вершини інцидентної позначеному раніше зворотному ребру, переходить по цьому ребру, фарбуючи його в чорний колір («Forward_BE_A»; «Forward_BE_B»). Якщо залишилися нерозпізані зворотні ребра, то АД повертається назад по пройденому на попередньому кроці ребру, фарбуючи в чорний колір ближній інцидентор, і продовжує пошук зворотних ребер. Після виявлення останнього зворотного ребра АД забарвлює ближній його інцидентор, в чорний колір («Recognized_BE_A»; «Recognized_BE_B») і завершує роботу в режимі розпізнавання зворотних ребер.

3. *Режим помітки перешийків.* Якщо в процесі обходу графа в вершині v було знайдено перешийок, то за умови, що всі раніше позначені даним АД перешийки були розпізані другим АД, агент перемикається в режим помітки перешийків. Якщо ж другий АД ще не розпізнав всі помічені перешийки, то перший АД не може мітити нові перешийки і у випадку, коли у першого АД відсутні інші можливі варіанти руху, крім як відмітити новий перешийок, він зупиняється до того моменту, поки другий АД не розпізнає всі помічені перешийки. Працюючи в цьому режимі АД фарбує ближні інцидентори всіх перешийків інцидентних вершині v в чорний колір («Mark_AB»; «Mark_BA»). Коли всі перешийки помічені робота АД в даному режимі завершується («Fix_A»; «Fix_B»). По завершенню режиму помітки перешийків АЕ містить інформацію про кількість помічених перешийків. В даному режимі роботи агент A має пріоритет над агентом B , тому в ситуації, коли обидва АД одночасно виявлять один і той же перешийок, він буде помічений агентом A .

4. *Режим розпізнавання перешийків.* Отримавши від АЕ команду про необхідність розпізнавання перешийків, АД перемикається в режим розпізнавання перешийків. Якщо в цей момент АД працює в режимі розпізнавання зворотних ребер, то він не переключиться в режим розпізнавання перешийків до завершення поточного режиму роботи. При перемиканні в цей режим АД перевіряє наявність з вершини, в якій він знаходиться, інших можливих шляхів переміщення

крім повернення назад по своєму шляху. Якщо такі шляхи є, то АД повертається назад по своєму шляху, нічого не фарбуючи («Stepback_A»; «Stepback_B»), до виявлення найближчої вершини, інцидентної білому ребру, у якого дальній інцидентор забарвлений в чорний колір, а дальня вершина – в «чужий» колір. Якщо ж таких шляхів немає, то повертаючись назад по своєму шляху, АД забарвлює його в чорний колір («Back_A»; «Back_B») до тих пір, поки не потрапить в вершину інцидентну позначеному перешийку або ж в вершину з іншими можливими шляхами переміщення. У другому випадку АД продовжує повертатися назад по своєму шляху, нічого не фарбуючи (кожен крок назад, відправляючи повідомлення «Stepback_A»; «Stepback_B») до виявлення найближчої вершини, інцидентної позначеному перешийку.

Якщо в процесі помітки перешийків було помічено один перешийок, то АД фарбує ближній інцидентор поміченого перешийка в чорний колір («Recognized_AB»; «Recognized_BA») і далі рухається вперед в кінець шляху «свого» кольору.

Якщо ж було позначено не менше двох перешийків, то АД забарвлює ближній інцидентор поміченого перешийка в «свій» колір («Recognized_AB»; «Recognized_BA»). Далі АД рухається назад по своєму шляху («Stepback_A»; «Stepback_B»), поки не буде знайдений наступний позначений перешийок. В цьому випадку, якщо позначений перешийок виявився не останнім, то АД забарвлює ближній інцидентор в чорний колір («Recognized_AB»; «Recognized_BA») і на наступному кроці АД знову повертається назад по своєму шляху до наступного поміченого перешийка («Stepback_A»; «Stepback_B»). Якщо ж позначений перешийок виявився останнім, то АД фарбує ближній інцидентор в «свій» колір («Recognized_AB»; «Recognized_BA»). На наступному кроці АД повідомляє АЕ про розпізнавання всіх помічених іншим АД перешийків («Settozero_A»; «Settozero_B»). Далі переходить по останньому перешийку в чужу область, забарвлюючи ближній інцидентор в чорний колір. На наступному кроці АД переходить по першому розпізаному перешийку в свою область, фарбуючи дальній інцидентор в чорний колір. Далі АД рухається вперед в кінець шляху «свого» кольору.

5. *Одночасне потрапляння двох АД в одну білу вершину.* У разі одночасного потрапляння обох АД в одну і ту ж білу вершину кожен з них фарбує вершину наполовину, і вона стає червоно-жовтою. На наступному кроці агент В робить крок назад по своєму шляху, видаляє фарбу, нанесену на попередньому кроці з ближнього інцидентора

і ребра, фарбує дальній інцидентор в чорний колір («Return_B») і переходить в режим помітки перешийків, причому ребро, по якому він здійснив перехід, вже пораховано як перший перешийок, а довжина жовтого шляху зменшена на одну вершину за рахунок обробки АЕ повідомлення «Return_B». Звернемо увагу, що агент А під час роботи на своєму шляху обробляє червоно-жовту вершину як вершину червоного кольору.

Пріоритетність перемикаання АД в один з можливих режимів роботи розподіляється наступним чином: насамперед ми повинні перевірити наявність помічених перешийків, тому найвищий пріоритет має режим розпізнавання перешийків; далі ми перевіряємо чи немає з поточної вершини перешийків, які можна помітити для розпізнавання агентом А, тому другим за пріоритетом перемикаання буде режим помітки перешийків; далі ми перевіряємо наявність зворотних ребер з поточної вершини, відповідно третім за пріоритетом у нас буде режим розпізнавання зворотних ребер; останнім по пріоритетності є звичайний режим роботи. Режим роботи АД у разі одночасного потрапляння їх в одну білу вершину не розглядається так як агент А в цьому випадку продовжує роботу в звичайному режимі, а для агента В в цей момент, вибір іншого режиму роботи буде недоступний.

Алгоритм роботи агента-експериментатора.

Вхід: списки повідомлень SS_A і SS_B від АД.

Вихід: список вершин V_H і ребер E_H графа H , ізоморфного графу G .

Дані: V_H , E_H списки вершин і ребер графа H . Ct_A , Ct_B – лічильники числа відвіданих вершин графа G агентами А і В відповідно. AN , BN – змінні, в яких значення «1» дає агентам А, В відповідно, сигнал для повернення та розпізнавання перешийків, значення «0» повідомляє агентам, що перешийки помічені для конкретного агента на розпізнавання відсутні. N_A , N_B – змінні, в яких зберігаються номери вершин, з яких агенти А і В відповідно, в останній раз помічали перешийки. F, K – кількість перешийків, помічених для розпізнавання, з вершин N_A , N_B відповідно. Q, Z – змінні, що використовуються в деяких підпрограмах роботи з перешийками, для зберігання початкових значень змінних F, K відповідно. SP_A , SP_B – списки повідомлень агентів А і В відповідно. E, L – змінні, в яких ставиться помітка про те, чи був на попередньому кроці агентом А чи В відповідно, помічений перешийок (значення «1») чи ні (значення «0»). i, j – лічильники, що використовуються агентами А і В відповідно при визначенні номерів других вершин помічених перешийків чи номерів

других вершин помічених зворотніх ребер. ST_A , ST_B – змінні, що використовуються агентами A і B відповідно, для повідомлення АЕ, про завершення розпізнавання свого підграфу. UDP_A , UDP_B – логічні змінні, що використовуються агентами A і B відповідно, для визначення способу фарбування інциденторів, перехідку, який розглядається в конкретний момент. $UDOBR_A$, $UDOBR_B$ – логічні змінні, що використовуються агентами A і B відповідно для визначення чи є зворотне ребро, що розглядається в даний момент останнім з помічених. $KOBR_A$, $KOBR_B$ – змінні, в які агенти A і B відповідно записують кількість помічених зворотніх ребер. $r(1), r(2), \dots, r(t)$ – список номерів вершин червоного шляху, де t – довжина цього списку. $y(1), y(2), \dots, y(p)$ – список номерів вершин жовтого шляху, де p – довжина цього списку. Mes – повідомлення, яке оброблюється в даний момент.

1. $AN := 0; BN := 0; N_A := 0; N_B := 0; F := 0;$
 $K := 0; SS_A := \emptyset; SS_B := \emptyset; E := 0; L := 0;$
 $i := 0; j := 0; E_H := \emptyset; Ct_A := 1; Ct_B := 2;$
 $V_H := \{Ct_A, Ct_B\}; t := 1; p := 1;$
 $r(t) := Ct_A; y(p) := Ct_B;$
 $UDP_A := False; UDP_B := False;$
 $UDOBR_A := False; UDOBR_B := False;$
 $KOBR_A := 0; KOBR_B := 0;$
 $STOP_A := 0; STOP_B := 0;$
2. *while* ($STOP_A=0$) or ($STOP_B=0$) *do*
3. *if* $SS_A \neq \emptyset$ *then do*
4. читаємо повідомлення в Mes ;
5. $SS_A := SS_A \setminus \{Mes\}$;
6. $List_processing_A()$;
7. *end do*;
8. *if* $SS_B \neq \emptyset$ *then do*
9. читаємо повідомлення в Mes ;
10. $SS_B := SS_B \setminus \{Mes\}$;
11. $List_processing_B()$;
12. *end do*;
13. *end do*;
14. друк V_H, E_H .

$List_processing_A()$:

1. *if* $Mes = "Forward_A"$ *then* $Forward_A()$;
2. *if* $Mes = "Back_A"$ *then* $Back_A()$;
3. *if* $Mes = "Stop_A"$ *then* $Stop_A()$;
4. *if* $Mes = "Mark_BE_A"$ *then* $Mark_BE_A()$;
5. *if* $Mes = "Stepback_A"$ *then* $Stepback_A()$;
6. *if* $Mes = "Forward_BE_A"$ *then* $Forward_BE_A()$;
7. *if* $Mes = "Recognized_BE_A"$ *then* $Recognized_BE_A()$;
8. *if* $Mes = "Mark_AB"$ *then* $Mark_AB()$;
9. *if* $Mes = "Fix_A"$ *then* $Fix_A()$;
10. *if* $Mes = "Recognized_AB"$ *then* $Recognized_AB()$;
11. *if* $Mes = "Settozero_A"$ *then* $Settozero_A()$;

$Forward_A()$:

$Ct_A := Ct_A + 2; t := t + 1; r(t) := Ct_A; V_H := V_H \cup \{Ct_A\}$
 $E_H := E_H \cup \{(r(t-1), r(t))\};$

$Back_A()$: зі списку $r(1), r(2), \dots, r(t)$ видаляється елемент $r(t)$; $t := t - 1$;

$Stop_A()$: $ST_A := 1$;

$Mark_BE_A()$: $KOBR_A := KOBR_A + 1$;

$Stepback_A()$: $i := i + 1$;

$Forward_BE_A()$:

$E_H := E_H \cup \{(r(t), r(t-i))\};$

$Recognized_BE_A()$: $i := 0$;

$Mark_AB()$: $F := F + 1; E := 1$;

$Fix_A()$:

$N_A := Ct_A; BN := 1; E := 0; Q := F; UDP_A :=$
 $((F = Q) \text{ or } (F = 1)) \text{ and } (Q \neq 1));$

$Recognized_AB()$:

$E_H := E_H \cup \{(N_B, r(t-i))\}; K := K - 1$;

$UDP_B := (((K = Z) \text{ or } (K = 1)) \text{ and } (Z \neq 1));$

$Settozero_A()$: $AN := 0; i := 0$;

Процедури роботи зі списком повідомлень від агента B , які не розглядаються нижче, аналогічні до процедур роботи зі списком повідомлень від агента A .

Процедура $List_processing_B()$ така ж як процедура $List_processing_A()$ за виключенням додаткової перевірки умови і виклику підпрограми: «*if* $Mes = "Return_B"$ *then* $Return_B()$ », яка стосується лише агента B і відноситься до режиму одночасного попадання двох АД в одну білу вершину.

$Return_B()$:

$E_H := E_H \setminus \{(y(p-1), y(p))\}; V_H := V_H \setminus \{Ct_B\}; Ct_B := Ct_B - 2;$

$p := p - 1; y(p) := Ct_B; L := 1; K := K + 1$;

Властивості алгоритму розпізнавання

За умови, що $n \geq 3$ як мінімум, по одному разу виконуються процедури: $Forward_A()$ і $Forward_B()$. В кожній з процедур створюється по одній вершині графа H . При одночасному попаданні двох АД в одну білу вершину цими процедурами буде створено дві нові вершини графа H . Вершина створена агентом B , на наступному кроці буде видалена процедурою $Return_B()$, так як вона дублює вершину створену агентом A . Таким чином, процес виконання описаного алгоритму індукує відображення $\phi: V_G \rightarrow V_H$ вершин графа G у вершини графа H . Причому $\phi(v) = t$ (коли вершина v пофарбована в червоний колір і $t = Ct_A$) і $\phi(s) = p$ (коли вершина s має жовтий колір і $p = t = Ct_B$). Вказане відображення природним чином встановлює неявну нумерацію вершин графа G . Більш того, відображення ϕ є бієкцією, оскільки в зв'язному графі G всі вершини

досяжні з початкових вершин. А це значить, що всі вершини відвідуються агентами, тобто фарбуються в червоний та жовтий кольори. При виконанні процедури $Forward_A()$ чи $Forward_B()$ АЕ розпізнає ребро (v, u) і так нумерує вершину u , що ребру (v, u) однозначно відповідає ребро $(\phi(v), \phi(u))$ графа H . При виконанні процедур $Forward_BE_A()$ чи $Forward_BE_B()$ АЕ розпізнає зворотнє ребро (v, u) графа G і ставить йому в однозначну відповідність ребро $(\phi(v), \phi(u))$ графа H . При виконанні процедур $Recognized_AB()$ або $Recognized_BA()$ АЕ розпізнає перешийок (v, u) графа G і ставить йому в однозначну відповідність ребро $(\phi(v), \phi(u))$ графа H . Відповідно, ϕ є ізоморфізмом графа G на граф H .

Теорема 1. Три агенти, виконавши алгоритм розпізнавання на графі G , розпізнають цей граф з точністю до ізоморфізму.

Підрахуємо часову, ємнісну та комунікаційну складності алгоритмів у рівномірній шкалі. При підрахунку часової складності алгоритму будемо вважати, що ініціалізація алгоритму, аналіз околу робочих вершин та вибір однієї з можливих процедур займають деяке постійне число одиниць часу. Так ми будемо вважати, що вибір ребер, прохід по ним АД та обробка повідомлень АЕ, отриманих на даному етапі від АД, здійснюється за одиницю часу. З опису алгоритму слідує, що на кожному кроці алгоритму червоний (жовтий) шлях – це звичайний шлях, що з'єднує початкову вершину v (s – у випадку агента B) з номером $\phi(v) = 1$ ($\phi(s) = 2$ – у випадку агента B) з вершиною u (z – у випадку агента B) з номером $\phi(u) = Ct_A$ ($\phi(z) = Ct_B$ – у випадку агента B). Отже, загальна довжина червоного та жовтого шляху не перевищує n .

Кожного разу при виконанні процедур звичайного режиму роботи кожен АД проходить одне ребро. Що означає, що процедури звичайного режиму роботи виконуються не більше ніж $2 \times (n - 1)$ рази (враховуючи, що АД в цьому режимі пройде по кожному ребру свого шляху два рази), а значить загальний час їх виконання оцінюється як $O(n)$.

При однократному виконанні процедур режиму розпізнавання зворотніх ребер АД помічає не більше $n - 2$ (так як граф простий і як мінімум одна вершина пофарбована в «чужий» колір) зворотніх ребер, по одному разу проходить не більш ніж $n - 2$ ребер червоного (жовтого) шляху, а також по два рази проходить не більше $n - 2$ зворотніх ребер. Час, що витрачається при роботі у режимі розпізнавання зворотніх ребер, оцінюється як $4 \times n \times O(n)$, тобто як $O(n^2)$.

При виконанні процедур режиму розпізнавання перешийків АД не здійснює переходів по перешийкам, а просто фарбує їх ближні інцидентори, після чого, надсилає повідомлення АЕ про

завершення режиму розпізнавання перешийків, на що також йде один хід. Тобто на роботу в цьому режимі йде час, що оцінюється як $n \times O(n) + O(n)$, тобто як $O(n^2)$.

При одноразовому виконанні процедури режиму розпізнавання перешийків АД проходять не більше $n - 2$ ребер червоного (жовтого) шляху, після чого, помічаючи перешейки як розпізнані, АД не виконують переходу по перешийку, а просто фарбують його ближній інцидентор. Закінчивши фарбування всіх помічених перешийків АД повідомляє про це АЕ, на що також йде один хід. Повертаючись після розпізнавання всіх перешийків АД може пройти максимум по одному разу два перешийка, а також не більше ніж $n - 2$ ребер червоного (жовтого) шляху. Час виконання цього режиму оцінюється як $O(n^2) + O(n^2) + O(n) + O(n) + O(n^2)$, тобто як $O(n^2)$.

Час простою агентів в очікуванні в цілому оцінюється як $O(n^2)$. Отже, сумарна часова складність алгоритму задовольняє співвідношенню: $T(n) = O(n^2)$. В свою чергу верхня оцінка числа переходів по ребрах $M(n)$, які здійснюють АД складає $M(n) = O(n^3)$.

Ємнісна складність алгоритму визначається складністю списків $V_H, E_H, r(1) \dots r(t), y(1) \dots y(p)$, складність яких відповідно визначається величинами $O(n), O(n^2), O(n), O(n)$. Отже, $S(n) = O(n^2)$.

На кожному кроці алгоритму АД можуть відправити АЕ не більше чотирьох повідомлень порізно або одночасно і отримати від нього не більше трьох повідомлень кожен, тому об'єм переданої агентами інформації оцінюється як $14 \times O(n^2)$. Отже, $K(n) = O(n^2)$.

З огляду на описані вище припущення про спосіб підрахунку часової складності, має місце наступна теорема.

Теорема 2. Часова, ємнісна, комунікаційна складності алгоритму та верхня оцінка числа переходів по ребрах дорівнюють $O(n^2)$, де n – число вершин графа, при цьому в алгоритмі використовується 3 фарби різного кольору.

Висновки. У роботі запропоновано новий метод і відповідний алгоритм розпізнавання графа колективом агентів. Основними перевагами побудованого алгоритму є те, що вдалося оптимізувати роботу агентів таким чином, що стало можливим використання АД зі скінченою пам'яттю, яка не залежить від розміру графа. Скінчену, необмежено зростаючу внутрішню пам'ять в нашому алгоритмі має тільки нерухомий АЕ, в пам'яті якого і відбувається побудова карти графа.

Також нами були досліджені часова, ємнісна, комунікаційна складності отриманого алгоритму та верхня оцінка числа переходу по ребрах, які здійснюють АД.

Список літератури:

1. Goth G. Exploring new frontiers. *Communications of the ACM*. 2009. 52(11). P. 21–23.
2. Banfi, J., Quattrini Li, A., Rekleitis, I. et al. Strategies for coordinated multirobot exploration with recurrent connectivity constraints. *Autonomous Robots*. 2018. 42 P. 875–894. <https://doi.org/10.1007/s10514-017-9652-y>
3. Nagavarapu, S.C., Vachhani, L., Sinha, A. et al. Generalizing Multi-agent Graph Exploration Techniques. *International Journal of Control, Automation and Systems*. 2020. <https://doi.org/10.1007/s12555-019-0067-8>
4. Nagavarapu, S.C., Vachhani, L. & Sinha, A. Multi-Robot Graph Exploration and Map Building with Collision Avoidance: A Decentralized Approach. *Journal of Intelligent & Robotic Systems*. 2016. 83. P. 503–523 <https://doi.org/10.1007/s10846-015-0309-9>
5. Wang H., Jenkin M., Dymond P. It can be beneficial to be ‘lazy’ when exploring graph-like worlds with multiple robots. *Advances in Computer Science and Engineering (ACSE)* : In Proceedings of the IASTED International Conference. 2009. P. 55–60.
6. Zhang C. Parallelizing Depth-First Search for Robotic Graph Exploration. Harvard College, Cambridge, Massachusetts. 2010.
7. Stepkin A.V. Using a collective of agents for exploration of undirected graphs. *Cybernetics and Systems Analysis*. 2015. T.51, №2. P. 223–233.
8. Shannon C.E. Presentation of a maze-solving machine. *Cybernetics Trans*, of the 8 th Conf. of the Josiah Macy Jr. Found / Editor: H. Foerster. 1951. P. 173–180.
9. Dopp K. Automaten in labirinth. *Electronische Informationsverarbeitung und Kybernetik*. 1971. V.7, № 2. P. 79–94.
10. Dudek G., Jenkin M. Computational principles of mobile robotics. *Cambridge Univ. press*. 2000. 280 p.
11. Dudek G., Jenkin M., Milios E., Wilkes D. Map validation in a graphlike world. *International Joint Conference on Artificial Intelligence* : Proceedings of the 13th international conference (Chambery, France, August 1993). San Fransisco, 1993. P. 1648–1653.
12. Dudek G., Jenkin M., Milios E., Wilkes D. Topological exploration with multiple robots. *Robotics with Application (ISORA)* : Proc. 7th International Symposium. Alaska, 1998
13. Das S., Flocchini P., Kutten S., Nayak A., Santoro N. Map construction of unknown graphs by multiple agents. *Theoretical Computer Science*. 2007. V.385, 1–3. P. 34–48.
14. Стьопкін А.В., Кіт М.Ю. Алгоритми розпізнавання графів колективом агентів. *Збірник наукових праць фізико-математичного факультету ДДПУ*. 2023. Вип. 13. С. 85–89.
15. Стьопкін А.В., Кіт М.Ю. Алгоритми розпізнавання графів колективом агентів та ознайомлення з ними в позакласній роботі з інформатики в закладах загальної середньої освіти. Матеріали математичного семінару до 85-річного ювілею академіка НАН України А.М. Самойленка (02.01.1938–04.12.2020). – Мардебург. – 2023. – С. 88.

Stopkin A.V. ALGORITHM FOR EXPLORATION OF A SIMPLE UNDIRECTED GRAPH BY A COLLECTIVE OF AGENTS

The article is devoted to the problem of a simple graphs exploration by a collective of agents. The article proposes a new algorithm for graphs exploration by a collective of agents, which consist of two agents-researchers with finite memory (the memory of the agents does not exceed the number of nodes of the explored graph), which use two different colors (in total three colors) for a graph exploration and one agent-experimenter, which is located outside an explored graph and has a finite, infinitely growing internal memory. The agents-researchers can move around the graph, read and change the labels of the graph elements, and also transmit the necessary information to the agent-experimenter. An agent-experimenter is a stationary agent in whose memory the result of the functioning of agents-researchers is fixed at each step and the representation of the investigated graph is gradually built up with a list of edges and a list of nodes.

The article describes the modes of operation of the agents-researchers with the order of their activation, and the messages that the agents exchange with each other in the process of work are discussed in detail. The complete algorithm of the agent-experimenter work is presented with a detailed description of the procedures for processing the messages received from the agents-researchers, on the basis of which a researched graph is explored (construction a map of a graph). The article also analyzes the time, capacity, and communication complexity of the built algorithm, as well as analyzes the number of transitions along edges performed by agents-researchers.

It was found that the presented algorithm of a graph exploration has quadratic (from the number of nodes of the explored graph) time, capacity, and communication complexities, as well as the number of transitions along the edges performed by agents-researchers. The algorithm of a graph exploration is based on the depth-first traversal method.

Key words: graph exploration, finite simple graphs, complexity of the algorithm, depth-first traversal method, collective of agents.

Тарасенко М.М.

Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу

Николайчук М.Я.

Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу

РОЗРОБКА І ТЕСТУВАННЯ АЛГОРИТМІВ ДИСТАНЦІЙНОГО ОПОВІЩЕННЯ ОПЕРАТОРІВ ГАЗОРОЗПОДІЛЬНИХ СТАНЦІЙ З ФУНКЦІЯМИ АВАРІЙНОЇ СИГНАЛІЗАЦІЇ НА ОСНОВІ GSM-КОМУНІКАЦІЇ

Створення і експлуатація систем диспетчерського керування газорозподільними станціями передбачає комплексне вирішення окремих інженерно-технічних і наукових задач.

Об'єктом досліджень є інформаційні процеси при забезпеченні режимів контролю і керування технологічним обладнанням газорозподільних станцій.

В роботі вирішуються задачі розроблення і тестування алгоритмів дистанційного оповіщення операторів газорозподільних станцій з функціями аварійної сигналізації на основі GSM-комунікації.

Перевагою реалізованих рішень дистанційного оповіщення операторів газорозподільних станцій є застосування сучасних апаратно-програмних засобів та інформаційних технологій з урахуванням специфіки та умов експлуатації технологічного обладнання об'єктів керування.

Розроблено апаратно-програмні засоби диспетчерського інтерфейсу системи керування газорозподільною станцією на основі PLC і SCADA з функціональністю дистанційного оповіщення операторів, що функціонує в режимі реального часу.

Особливостями розробленої підсистеми дистанційного оповіщення операторів газорозподільних станцій є розширена функціональність за рахунок інтеграції режимів і алгоритмів аварійної сигналізації про вихід технологічних параметрів за встановлені межі на основі глобальної GSM-комунікації.

Додатково підсистема дистанційного оповіщення операторів газорозподільних станцій забезпечує резервне живлення електронних компонентів, а також передбачає можливість розширення і модернізації.

Розроблена підсистема дистанційного оповіщення операторів газорозподільних станцій реалізована і експлуатується на технологічних об'єктах газотранспортної системи.

В результаті реалізації запропонованих алгоритмів дистанційного оповіщення операторів газорозподільних станцій підвищено надійність і техніко-економічні показники при експлуатації технологічного обладнання.

В статті наведено результати створення і експлуатації систем диспетчерського керування газорозподільними станціями на основі комплексного вирішення окремих інженерно-технічних і наукових задач.

В роботі вирішено задачі розроблення і тестування алгоритмів дистанційного оповіщення операторів газорозподільних станцій з функціями аварійної сигналізації на основі GSM-комунікації.

Досліджено інформаційні процеси при забезпеченні режимів контролю і керування технологічним обладнанням газорозподільних станцій.

Вказано на переваги реалізованих рішень дистанційного оповіщення операторів газорозподільних станцій на базі сучасних апаратно-програмних засобів та інформаційних технологій з урахуванням специфіки та умов експлуатації технологічного обладнання.

Розроблено алгоритм оповіщення операторів газорозподільних станцій і прикладне програмне забезпечення на мові FBD стандарту IEC 61131-3.

Розширено функціональність підсистеми дистанційного оповіщення операторів газорозподільних станцій за рахунок інтеграції алгоритмів голосового оповіщення і режимів роботи аварійної сигналізації на основі GSM-комунікації.

Розроблено диспетчерський інтерфейс системи керування газорозподільною станцією на основі PLC і SCADA з функціональністю дистанційного оповіщення операторів, що функціонує в режимі реального часу.

Для підсистеми дистанційного оповіщення операторів газорозподільних станцій забезпечено резервне живлення електронних компонентів, а також передбачено можливість розширення і модернізації.

Розроблена підсистема дистанційного оповіщення операторів газорозподільних станцій реалізована і експлуатується на технологічних об'єктах газотранспортної системи.

В результаті реалізації запропонованих алгоритмів дистанційного оповіщення операторів газорозподільних станцій підвищено надійність і техніко-економічні показники при експлуатації технологічного обладнання.

Ключові слова: газорозподільна станція, диспетчерське керування, алгоритми оповіщення, PLC, SCADA, GSM-комунікація.

Постановка проблеми. Розвиток сучасних технологій та технологічного обладнання досягли рівня, при якому автоматизація виробничих процесів стає необхідністю, яка відіграє вирішальну роль у питаннях продуктивності, якості, безпечного та безаварійного функціонування технологічних об'єктів. Сучасні системи управління на основі PLC (Programmable Logic Controller) здатні вирішувати завдання управління, в тому числі в газовій промисловості.

Надійне та безпечне постачання газу споживачам України є одним із пріоритетних та стратегічних завдань для виробничих підрозділів оператора газотранспортної системи України. Вирішення вищевказаної задачі забезпечується впровадженням організаційних та технічних заходів, в тому числі і підвищенням рівня надійності роботи технологічного обладнання діючих газорозподільних станцій (ГРС).

Морально застаріле та фізично зношене обладнання ГРС потребує технічного переоснащення, реконструкції та модернізації. Разом з тим, реконструкції підлягають в основному всі ГРС, які забезпечують газопостачання споживачів, незалежно від типу та значимості об'єкту споживання.

Результат вищеперерахованих заходів направлений насамперед на:

- підвищення ефективності використання технологічного обладнання на ГРС;
- захисту технологічного обладнання ГРС при аварійних ситуаціях та надійності керування процесом транспортування газу;
- забезпечення систем керування верхнього рівня достовірною та оперативною інформацією про хід технологічних процесів у режимі реального часу;
- попередження аварійних ситуацій за рахунок своєчасного їх виявлення.

В даній роботі, вказані задачі вирішуються і реалізуються на сучасних апаратно-програмних засобах світового виробника «Phoenix Contact» [...] і впроваджені на діючих об'єктах.

Аналіз останніх досліджень і публікацій.

Аналіз поточного стану САК ГРС вказує на комплексність науково-технічних задач при створенні та експлуатації таких систем. При цьому, застосування уніфікованих апаратно-програмних засобів на базі PLC і SCADA, ефективних алгоритмів і прикладного програмного забезпечення на основі сучасних інформаційних технологій є пріоритетним напрямком.

Вказана проблематика висвітлена, як в наукових періодичних виданнях, так і в технічній документації виробників апаратно-програмних засобів систем автоматизованого керування технологічними об'єктами, регламентах та нормативно-правовій базі.

В роботі [1] проведено огляд бездротових і супутникових послуг M2M/IoT в інтелектуальних мережах «Smart Grids». Показано переваги сучасних бездротових технологій до покоління 5G та супутникових комунікацій. Наведено функціональні рішення на базі SCADA. При цьому в не наведено результатів проектування компонентів систем [1] контролю і керування розподіленими об'єктами на базі уніфікованих апаратно-програмних засобів.

В [2] наведено результати проектування системи керування польовими станціями газопостачання на основі PLC і сучасних GSM-комунікацій. Вказано на недоліки застосування апаратно-програмних засобів різних виробників і запропоновано «cloud» топологію з централізованим сервером на основі уніфікованої SCADA. В [2] залишились не вирішеними задачі голосового оповіщення операторів польових станцій газопостачання.

В публікації [3] наведено результати розроблення і дослідження інтелектуальної системи IoT на базі SCADA дистанційного моніторингу гібридної потужності для на станції керування газопроводом природного газу. Розроблено диспетчерський інтерфейс на базі SCADA. Забезпечено резервне живлення компонентів системи від альтернативного джерела сонячної енергії.

Апаратне забезпечення розробки виконано на основі мікроконтролера ESP32-WROOM-32, що не забезпечує вимоги до уніфікації та надійності систем критичної інфраструктури.

В роботі [4] розробляється система моніторингу та контролю технологічних параметрів кластера в установці закачування газу під високим тиском на основі SCADA GALBA®. Перевагою запропонованого рішення є дистанційне керування і параметрування інтелектуального запірного клапану на базі HART-протоколу, а також розроблений алгоритм керування і статистичний аналізу даних. Робота є об'ємною і додатково містить елементи імітаційного моделювання. Не вирішеним є питання голосового оповіщення операторів і технічного персоналу про нештатні ситуації в процесі експлуатації системи.

Робота [5] стосується моніторингу використання бездротових сенсорних мереж в газорозподільних мережах. Виконано моделювання різних протоколів маршрутизації для розгорнутих бездротових сенсорних мереж газорозподільних трубопроводів, що надає цінну інформацію про роботоздатність, продуктивність та інші важливі параметри системи. В [5] особлива увага приділена розрахунку оптимального розміщення вузла приймача шляхом моделювання різних протоколів передавання даних на основі реальних географічних локацій вузлів, реальних рівнів потужностей і енергоспоживання різними процесами в бездротових сенсорних мережах.

На основі проведеного аналізу можна узагальнити, що створення САК технологічними об'єктами повинно базуватись на основі сучасних уніфікованих апаратно-програмних засобів (PLC і SCADA) та інформаційних технологій і мати розширену функціональність, в тому числі дистанційне голосове оповіщення диспетчерів і операторів промислових технологічних об'єктів [6–7].

Постановка завдання. Метою роботи і проведених дослідно-конструкторських робіт є створення та тестування підсистеми дистанційного оповіщення операторів газорозподільних станцій на основі сучасних апаратно-програмних засобів та інформаційних технологій.

Досягнення визначеної мети забезпечить підвищення оперативності контролю і керування, показників надійності експлуатації технологічного обладнання в системах диспетчерського керування газорозподільними станціями, а також розширить їх функціональність за рахунок інтеграції алгоритмів дистанційного оповіщення операторів.

Для досягнення мети необхідно вирішити наступні задачі:

- визначити технологічні параметри, що підлягають включенню в алгоритми дистанційного оповіщення операторів газорозподільних станцій
- розробити і реалізувати алгоритми дистанційного оповіщення операторів газорозподільних станцій;
- розробити апаратно-програмні засоби підсистеми дистанційного оповіщення операторів газорозподільних станцій;
- дослідити режими роботи та інформаційні процеси при реалізації алгоритмів і підсистеми дистанційного оповіщення операторів газорозподільних станцій.

Виклад основного матеріалу.

Аналіз технологічного об'єкту та визначення задач дослідження

Газорозподільна станція (ГРС) – об'єкт, що входить до складу магістрального або промислового газопроводу, розрахованого на роботу при робочому тиску від 1.2 до 7.4 МПа. ГРС призначені для забезпечення газом промислових, комунально-побутових підприємств і населення, а також власних потреб підприємств газонафтового комплексу. До функцій ГРС також входить очищення природного газу від механічних домішок і рідини, редукування тиску газу до заданої величини (0.3–1.2 МПа) і підтримання його з необхідною точністю, вимірювання кількості поданого споживачам газу та одоризації природного газу перед подачею споживачам (рис. 1).

ГРС знаходяться на балансі спеціалізованих газотранспортних або газовидобувних підприємств.

Основними складовими ГРС є вузли перемикавання, очищення, підігрівання, редукування, вимірювання та одоризації газу.

Технологічна схема ГРС забезпечує їх надійну роботу без втручання обслуговуючого персоналу, для чого до її складу входять додаткові захисні пристрої, які забезпечують безперебійну роботу ГРС у разі виходу з ладу основних регульовальних засобів (рис. 2).

Одним з пріоритетних напрямків впровадження систем автоматизованого керування (АСК) на ГРС є система передачі даних та оповіщення (ПДО), що забезпечує працездатність, з одночасним повідомленням про відмови на диспетчерський рівень по існуючим резервованим каналах зв'язку (наприклад, по каналах диспетчерського зв'язку та мобільного зв'язку GSM).

Таким чином для реалізації ПДО необхідно визначити технологічні параметри САК ГРС і виділити з них найбільш критичні, які будуть реалізовані системою ПДО.

ГРС може функціонувати в режимі САК з функціями ПДО, або в режимі ПДО. Для режиму ПДО визначено наступний перелік аварійних сигналів (табл. 1).

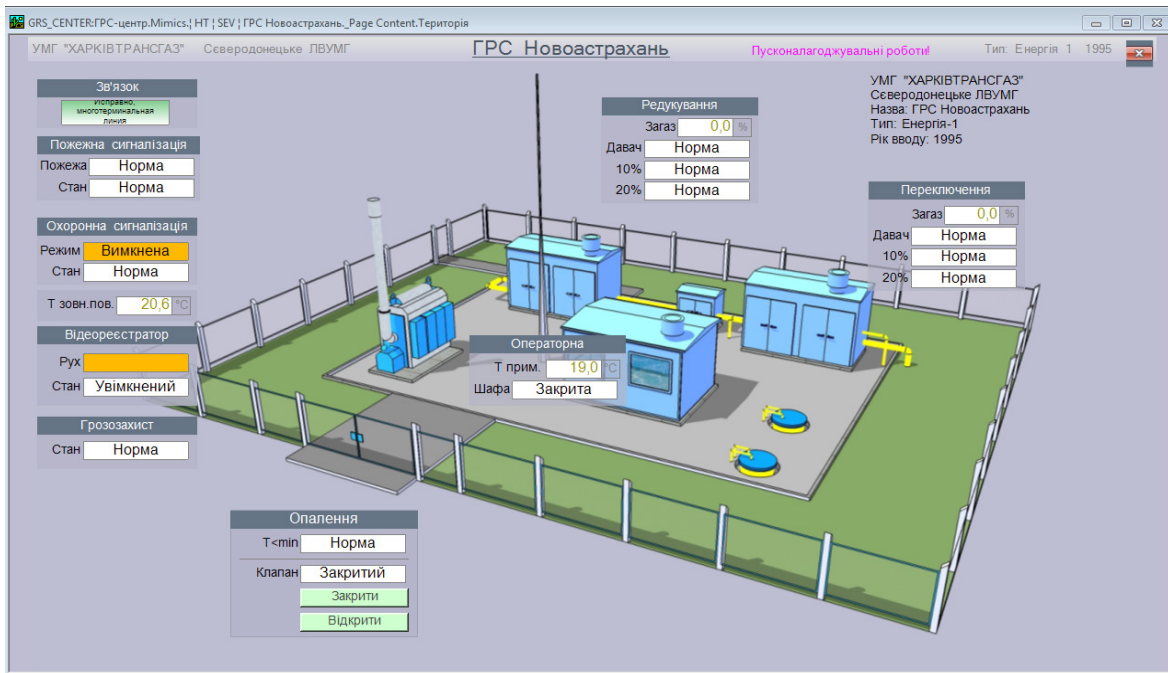


Рис. 1. Мнемосхема структури ГРС

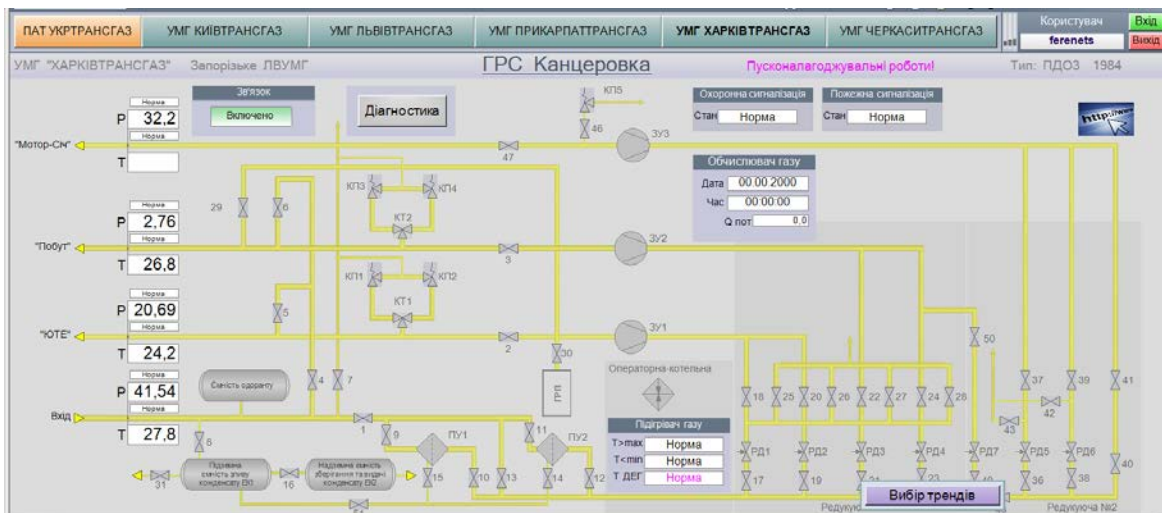


Рис. 2. Технологічна схема газорозподільної станції

Таблиця 1
Перелік аварійних сигналів ГРС

№ сигналу	Найменування сигналу	Тип сигналу
1	перевищення тиску на вході ГРС	дискретний
2	пониження тиску на вході ГРС	дискретний
3	перевищення тиску на виході ГРС	дискретний
4	пониження тиску на виході ГРС	дискретний
5	пожежа на ГРС	дискретний
6	загазованість на ГРС вище 10%	дискретний
7	загазованість на ГРС вище 20%	дискретний
8	аварія підігрівача	дискретний
9	аварія одоризаційної установки	дискретний
10	несанкціоноване проникнення	дискретний

Продовження таблиці 1

№ сигналу	Найменування сигналу	Тип сигналу
11	відсутнє основне живлення	дискретний
12	відсутній зв'язок	дискретний
13	температура теплоносія котла вище норми	дискретний
14	температура теплоносія котла нище норми	дискретний
15	тиск газу на вході ГРС	аналоговий
16	тиск газу на виході ГРС	аналоговий
17	температура газу на вході ГРС	аналоговий
18	температура газу на виході ГРС	аналоговий

Розроблення підсистеми передачі даних та дистанційного оповіщення операторів ГРС

Блок передачі даних та оповіщення (ПДО) призначений для використання на діючих технологічних об'єктах та на об'єктах, що підлягають реконструкції та модернізації, а також на об'єктах, що проєктуються.

- Блок ПДО виконує наступні основні функції:
- автоматичне вимірювання аналогових сигналів;
 - автоматична реєстрація дискретних сигналів;
 - організація обміну даними систем верхнього рівня із зовнішніми підсистемами;
 - збір аварійних та попереджувальних сигналів та передача їх на верхній рівень;
 - голосове оповіщення оператора про спрацювання кожного з каналів сигналізації;
 - резервування каналів передачі даних з автоматичним перемиканням між ними;
 - забезпечення резервного живлення блоку ПДО при відсутності основного джерела живлення.

ПДО забезпечує автоматичне вимірювання аналогових сигналів від вимірювальних перетворювачів з вихідними сигналами постійного струму в діапазоні від 4 до 20 мА і перетворення їх в абсолютні значення фізичної величини контрольованих параметрів.

ПДО функціонує в безперервному режимі роботи, автоматично (без постійної присутності персоналу).

Програмно-технічні засоби комплексу виконані у вигляді окремих функціонально і конструктивно завершених пристроїв, які компонуються на монтажну панель і встановлюються в уніфіковані несучі конструкції.

ПДО розташована безпосередньо на території технологічного об'єкту, виконує в автоматичному режимі збір інформації про значення параметрів газового потоку (температури та тиску газу), виконує попередню обробку отриманої інформації, перетворює змінену інформацію в кодоване повідомлення і у відповідь на отриману з диспетчерського пункту (ДП) команду опитування відсилає це повідомлення у канал зв'язку.

ПДО забезпечує збір сигналів охоронної системи та інших аварійних сигналів, формує сигнал на ввімкнення сигналізації та сигналу «аварія загальна».

Алгоритм обробки інформації передбачає такі режими збору даних:

- опитування (у тому числі на вимогу) всієї інформації про технологічні параметри за цифровими і аналоговими сигналам, збере-

ження в оперативній пам'яті і вивід інформації за запитом;

- виявлення попередження або аварії за цифровими або аналоговими сигналами, збереження інформації в оперативній пам'яті, виведення на звукову сигналізацію;

- виявлення значних відхилень технологічних параметрів за цифровими або аналоговими сигналами, збереження інформації в оперативній пам'яті, виведення на звукову сигналізацію.

Алгоритм і режими роботи забезпечуються функціональним програмним забезпеченням, яке встановлюється при виготовленні кожної підсистеми ПДО.

Алгоритм роботи підсистеми дистанційного оповіщення операторів ГРС

Режими роботи забезпечуються функціональним програмним забезпеченням ПДО за алгоритмом наведеним на рис. 3. При виникненні визначеної аварійної ситуації САК ГРС формується дискретний сигнал, який надходить на відповідний GSM-модуль (один з його каналів оповіщення).

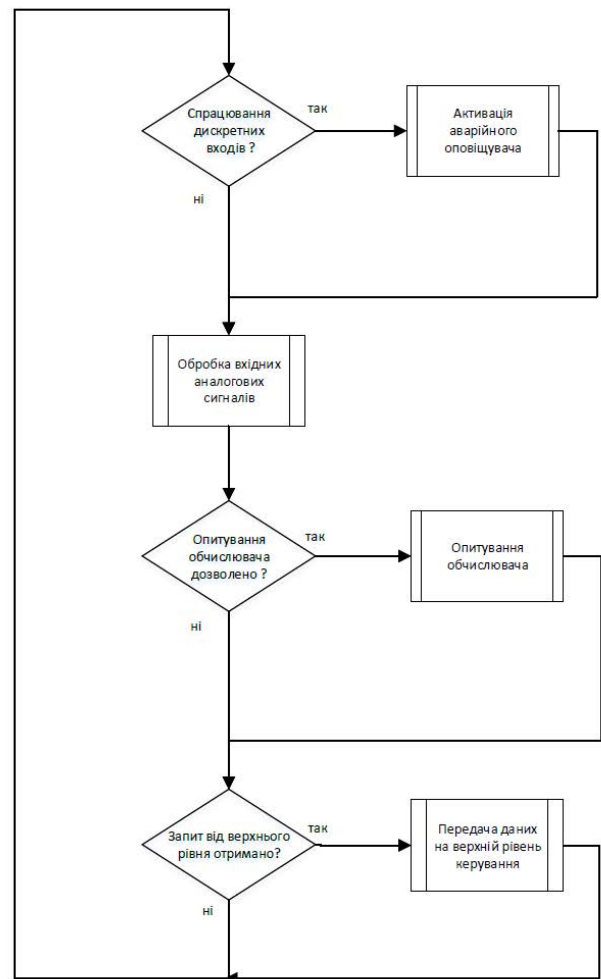


Рис. 3. Алгоритм функціонування підсистеми передачі даних і оповіщення

Під час отримання вищевказаного сигналу сигналу ПДО запускає виконання наступного алгоритму:

- дозвін на перший запрограмований номер:
- в разі не підтвердження прийняття голосового виклику абонентом № 1, програма виконує повторний дозвін на номер даного абоненту;
- в разі, якщо абонент № 1 повторно не підтвердив прийняття голосового виклику, алгоритм знову виконує повторний дозвін на номер даного абоненту;
- при не підтвердженні прийняття голосового виклику втретє абонентом № 1, алгоритм починає дозвін на запрограмований номер абонента № 2;
- в разі не підтвердження прийняття голосового виклику абонентом № 2, алгоритм виконує повторний дозвін на номер даного абоненту;
- при не підтвердженні прийняття голосового виклику втретє абонентом № 2, алгоритм починає дозвін на запрограмований номер абонента № 3.
- в разі не підтвердження прийняття голосового виклику абонентом № 3, алгоритм виконує повторний дозвін на номер даного абонента;
- в разі, якщо абонент № 3 повторно не підтвердив прийняття голосового виклику, алгоритм знову виконує повторний дозвін на номер даного абоненту.
- при не підтвердженні прийняття голосового виклику втретє абонентом № 3, алгоритм починає дозвін на запрограмований номер абонента № 1.

ПДО забезпечує голосове оповіщення що найменше трьох абонентів для своєчасного виявлення аварійних ситуацій за рахунок своєчасного оповіщення за наступним алгоритмом:

При отриманні аварійного сигналу система здійснює дзвінок черговому оператору ГРС, якщо дзвінок прийнято, система відтворює голосове повідомлення, яке відповідає аварійному сигналу. Для квітування сигналу необхідно в тональному режимі набрати відповідну комбінацію клавіш на мобільному терміналі. Набір номера чергового оператора здійснюється три рази. Якщо оператор ГРС не відповідає, система три рази здійснює набір чергового диспетчера, у разі якщо черговий диспетчер не відповідає, система три рази здійснює набір номера начальника служби ГРС або іншого абонента, номер якого занесено в пам'ять ПДО. Якщо третій абонент не відповідає система починає відпрацювання алгоритму з початку.

Система збирає інформацію про 16 дискретних сигналів і 4 гальванічно розв'язаних аналогових сигнали (тиск газу на вході, тиск газу на

виході, температура газу на вході, температура газу на виході). Інформація повинна передаватися на верхній рівень в режимі «on-line» резервованими та захищеними каналами GSM. Для зв'язку з підсистемами ГРС система має прозорий перетворювач IP-RS232/RS485 трьох інтерфейсів.

Розроблення апаратно-програмних засобів підсистеми дистанційного оповіщення операторів газорозподільних станцій

Апаратно-програмні засоби підсистеми дистанційного оповіщення операторів газорозподільних станцій розроблені на базі ILC 151 GSM/GPRS [8] та інструментального програмного забезпечення «PC Worx» німецького виробника «Phoenix Contact» [9].

Після створення проекту виконано вибір ILC 151 GSM/GPRS (рис. 4).

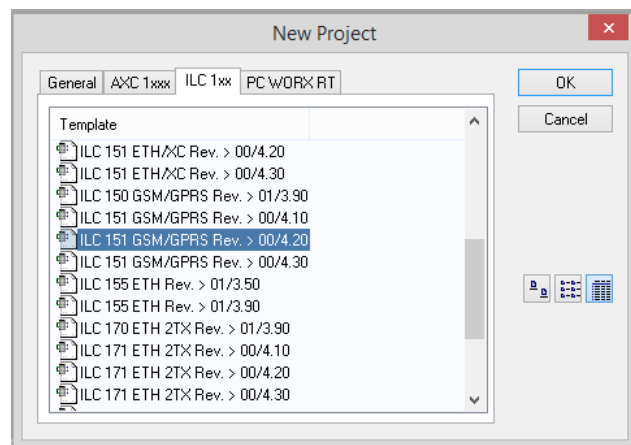


Рис. 4. Процедура вибору ILC 151 GSM/GPRS в «PC Worx»

Для з'єднання з PLC ILC 151 GSM/GPRS необхідно в проекті задати мережеві параметри, а також виконати конфігурування і параметрування апаратних засобів проекту на базі ILC 151 GSM/GPRS в «PC Worx» наведена на рис. 5.

На рис. 6 наведено тесту проекту в розділі «Communication» через команду «Test» в режимі «on-line».

Прикладне програмне забезпечення підсистеми ПДО

Прикладне програмне забезпечення підсистеми ПДО реалізовано на основі розробленого алгоритму засобами мови програмування FBD (Function Block Diagram) стандарту IEC 61131-3 [10].

Прикладне програмне забезпечення підсистеми ПДО включає:

- програмні блоки первинної обробки аналогових і цифрових сигналів визначених технологічних параметрів САК ГРС;

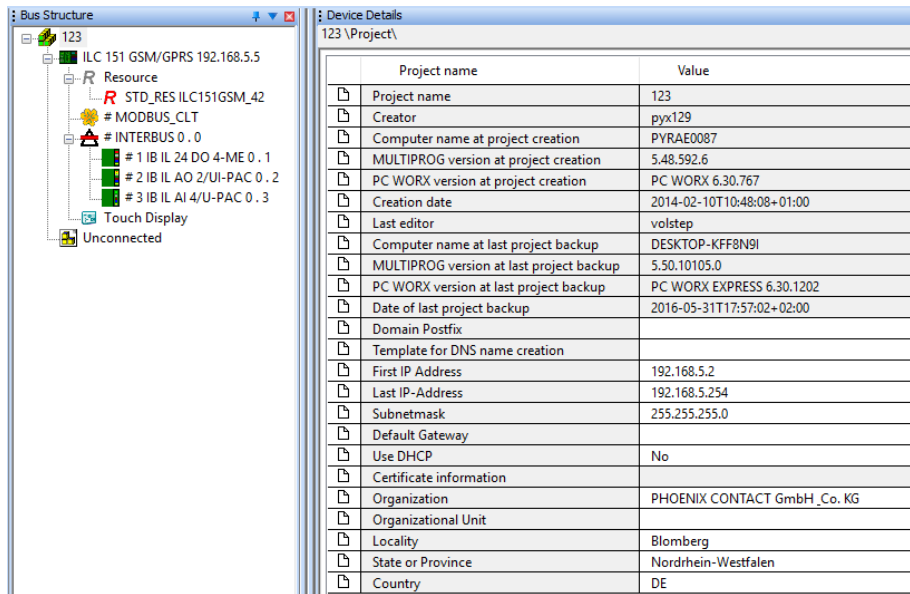


Рис. 5. Процедура конфігурування параметрування проекту на базі ILC 151 GSM/GPRS в «PC Worx»

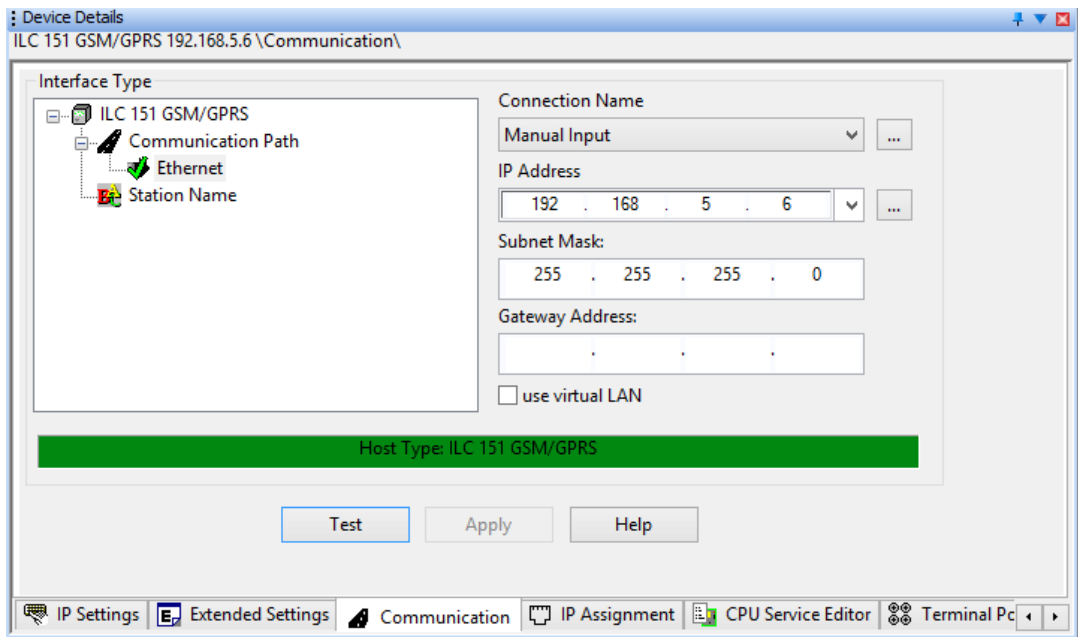


Рис. 6. Результати тесту проекту в розділі «Communication» через команду «Test» в режимі «on-line»

- програмні блоки керування виконавчими механізмами технологічного об'єкту.
- програмні блоки формування протоколів обміну даними між компонентами САК ГРС;
- програмні блоки GSM-комунікації на різних рівнях САК ГРС, в тому числі для задач ПДО.

GSM-функції ILC 151 GSM/GPRS в «PC Worx»

GSM-функції ILC 151 GSM/GPRS в «PC Worx» використовуються для передачі даних в GSM-мережах мобільного зв'язку. Дані передаються за допомогою функціональних IP-блоків (табл. 2).

Таблиця 2

Призначення функціональних блоків GPRS

Функціональний блок	Призначення
«GPRS_CONNECT»	GPRS-комунікація активується/деактивується
«MOBILE_CONNECT»	параметрування і діагностики модему, вбудованого в ILC 151 GSM/GPRS
«IP_CONNECT»	управління IP-комунікацією через «time-out»

Функціональний блок «GPRS_CONNECT» (рис. 7) використовується для активації/деактивації GPRS-комунікації в мережі GSM.

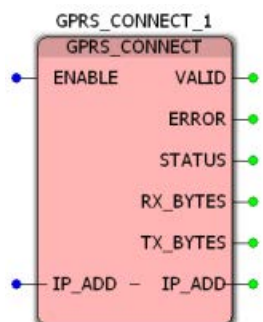


Рис. 7. Функціональний блок «GPRS_CONNECT»

Після реєстрації в мережі GSM через активовану функцію блоку «GPRS_CONNECT» з визначеними параметрами, дані можуть передаватися в мобільній мережі на базі протоколів TCP/IP.

Використання GPRS-комунікації реєструється у провайдера мобільного зв'язку за допомогою модему, вбудованого в ILC 151 GSM/GPRS. Після конфігурації ILC 151 GSM/GPRS, це може бути зроблено автоматично за допомогою функціонального блоку «MOBILE_CONNECT» або «Properties GSM в «PC Worx» (рис. 8).

Функціональний блок «MOBILE_CONNECT» використовується для параметрування і діагностики модему, який вбудований в ILC 151 GSM/GPRS.

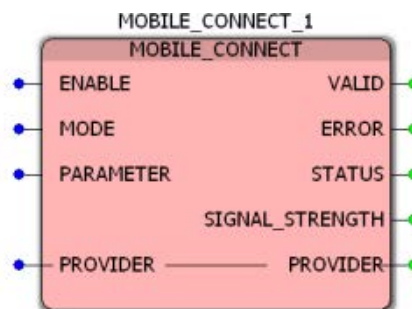


Рис. 8. Функціональний блок «MOBILE_CONNECT»

Модем завжди активований після параметрування ILC 151 GSM/GPRS була з напругою живлення.

Функціональний блок забезпечує наступну діагностичну інформацію:

- відомості про реєстрацію SIM-карти мобільного оператора GSM-комунікації;
- рівень сигналу підключення в мобільній GSM-мережі;
- поточний постачальник послуг мобільної GSM-комунікації.

Параметри, необхідні для встановлення з'єднання в GSM-мережі мобільного зв'язку можуть бути вказані в «PC Worx» за допомогою функції програмного блоку «MOBILE_CONNECT» або через вкладку «Extended Settings» (рис. 9).

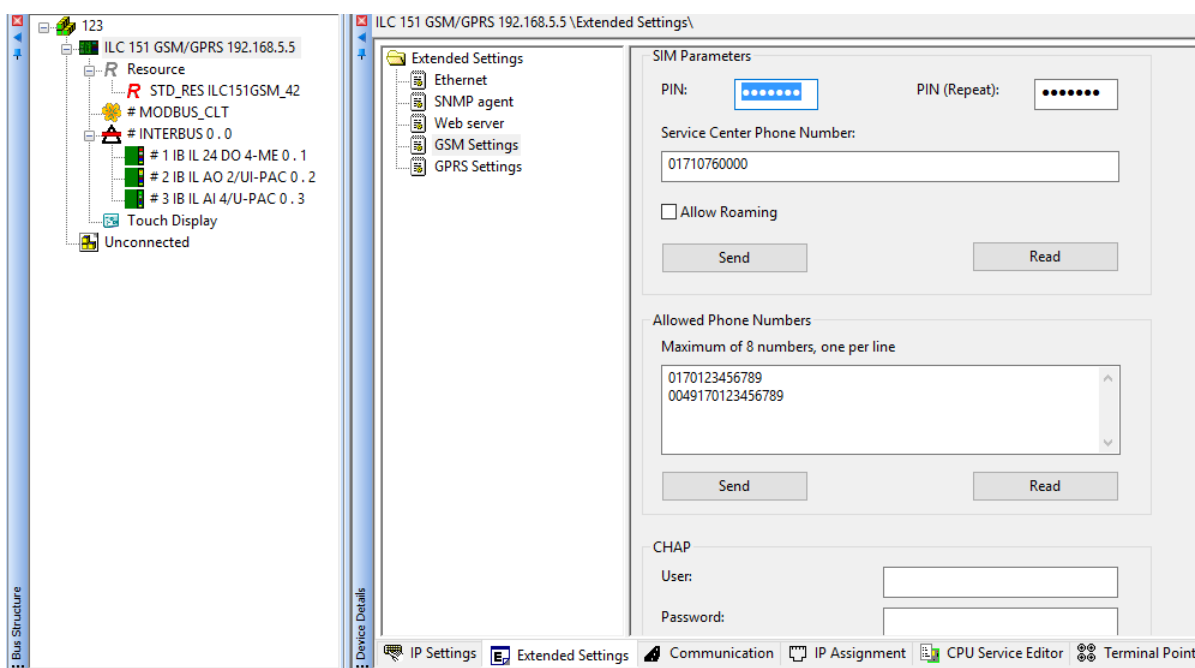


Рис. 9. Параметрування GSM-комунікації за допомогою функції програмного блоку «MOBILE_CONNECT» в «PC Worx»

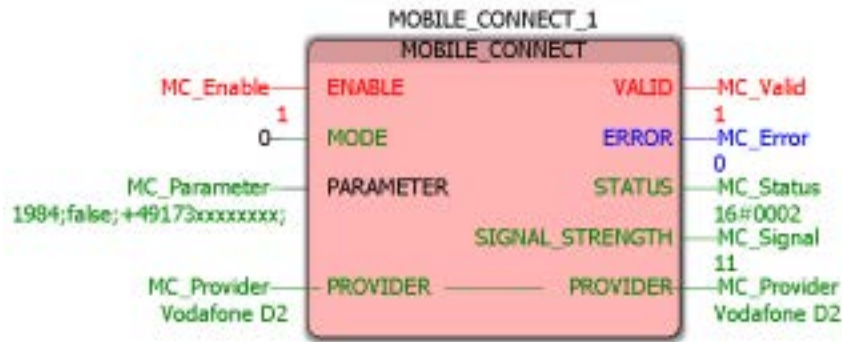


Рис. 10. Тестування і діагностика GSM/GPRS-комунікації

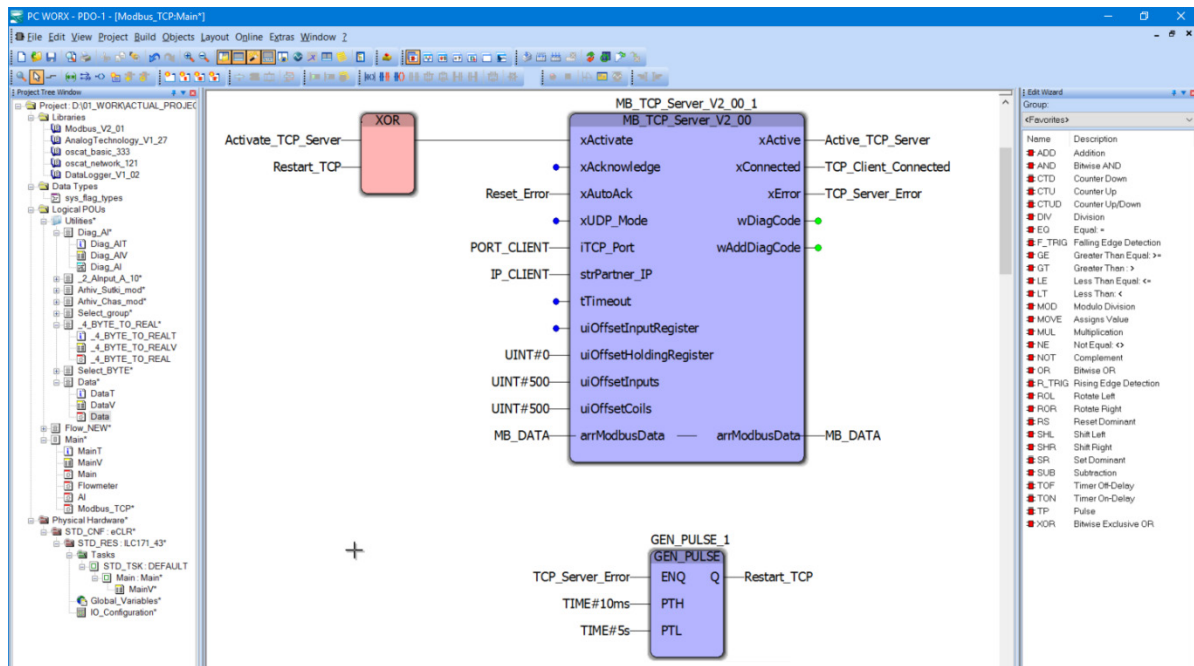


Рис. 11. Фрагмент прикладної програми реалізації ModBus TCP-комунікації для обміну даними між компонентами САК ГПС

Тестування і діагностика GSM/GPRS комунікації

Успішна реєстрація в мережі мобільного зв'язку GSM позначається сигналом «TRUE» на виході «VALID» при сигналі «TRUE» на вході «ENABLE» (рис. 10).

На рис. 11 наведено фрагмент прикладної програми реалізації ModBus TCP-комунікації для обміну даними між компонентами САК ГПС.

Таким чином, запропоновані, реалізовані і апробовані рішення підсистеми дистанційного оповіщення операторів ГПС можуть мати розвиток в напрямку застосування розроблених алгоритмів і апаратно-програмних засобів для інших промислових технологічних об'єктів.

Висновки.

1. На основі аналізу об'єкту керування та вимог до його функціональності і технічних характе-

стик визначено найбільш критичні технологічні параметри САК ГПС, що будуть реалізовані підсистемою передачі даних і оповіщення.

2. Виконано дослідно-конструкторські роботи з розроблення уніфікованих апаратно-програмних засобів системи дистанційного оповіщення операторів газорозподільних станцій з можливістю розширення і модернізації на базі PLC і SCADA.

3. Розроблено і реалізовано алгоритми передачі даних і дистанційного оповіщення операторів ГПС про 16 дискретних сигналів і 4 аналогових сигнали на базі GSM-комунікації. Основною перевагою реалізованого алгоритму є можливість автоматичного дистанційного оповіщення до трьох абонентів у вигляді голосового повідомлення і формування сигналу «загальна аварія».

4. Розроблено і протестовано прикладне програмне забезпечення для ILC 151 GSM/GPRS на мові програмування FBD, зокрема застосовані програмні функціональні блоки «GPRS_CONNECT» і «MOBILE_CONNECT» для управління GSM-комунікацією.

Список літератури:

1. Sohraby, K., Minoli, D., Occhiogrosso, B., & Wang, W. (2017). A Review of Wireless and Satellite-Based M2M/IoT Services in Support of Smart Grids. *Mobile Networks and Applications*, 23(4), 881–895. <https://doi.org/10.1007/s11036-017-0955-1>.
2. JiYuLei Dai, Jun Hu, Kai Shu, and Honbo Zhou "Field gas supply station monitoring based on software-defined PLC edge server", *Proc. SPIE 12702, International Conference on Intelligent Systems, Communications, and Computer Networks (ISCCN 2023)*, 127022V (16 June 2023); <https://doi.org/10.1117/12.2679696>.
3. Waqas, M.; Jamil, M. Smart IoT SCADA System for Hybrid Power Monitoring in Remote Natural Gas Pipeline Control Stations. *Electronics* 2024, 13, 3235. <https://doi.org/10.3390/electronics13163235>.
4. Ronceros, C.; Medina, J.; Vásquez, J.; León, P.; Fernández, J.; Urday, E. Supervision and Control System of the Operational Variables of a Cluster in a High-Pressure Gas Injection Plant. *Processes* 2023, 11, 698. <https://doi.org/10.3390/pr11030698>.
5. Abbas, Z., Anjum, M. R., Younus, M. U., & Chowdhry, B. S. (2021). Monitoring of Gas Distribution Pipelines Network Using Wireless Sensor Networks. *Wireless Personal Communications*, 117(3), 2575–2594. <https://doi.org/10.1007/s11277-020-07997-6>.
6. Сучасні та інноваційні технології в безпеці газопостачання: монографія / В. С. Сідак, В. М. Супонев, Ю. Ф. Броневський; за заг. ред. В. С. Сідака; Харків. нац. ун-т міськ. госп-ва ім. О. М. Бекетова. – Харків : ХНУМГ ім. О. М. Бекетова, 2015. – 433 с. ISBN 978-966-695-368-4.
7. Павлов К.В., Павлова О.М., Коротя М.І. Регулювання діяльності регіональних газорозподільних підприємств України: монографія / К.В. Павлов, О.М. Павлова, М.І. Коротя. – Луцьк: СПД Гадяк Жанна Володимирівна, друкарня «Волиньполіграф», 2020. – 256 с. ISBN 978-617-7843-03-9.
8. ILC 151 GSM/GPRS. [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://www.phoenixcontact.com/uk-ua/produkcija/controller-ilc-151-gsm-gprs-2700977>.
9. PC Worx. [Електронний ресурс]. Режим доступу: https://www.phoenixcontact.com/global-search/search?q=pcworx&_locale=uk-UA&_realm=ua.
10. IEC 61131-3. [Електронний ресурс]. Режим доступу: https://web.archive.org/web/20160729192745/http://www.plcsystems.ru/catalog/SCADAPack/doc/IEC61131%20User%20and%20Reference%20Manual_April_22_2008.pdf.

Tarasenko M.M., Nykolaychuk M.Ya. DEVELOPMENT AND TESTING OF REMOTE NOTIFICATION ALGORITHMS OF OPERATORS OF GAS DISTRIBUTION STATIONS WITH EMERGENCY ALARM FUNCTIONS BASED ON GSM-COMMUNICATION

The creation and operation of dispatching control systems for gas distribution stations involves the complex solution of separate engineering, technical and scientific problems.

The object of research is information processes in the provision of modes of monitoring and control of the technological equipment of gas distribution stations.

The work solves the problems of developing and testing algorithms for remote notification of operators of gas distribution stations with emergency signaling functions based on GSM-communication.

The advantage of implemented solutions for remote notification of operators of gas distribution stations is the use of modern hardware and software tools and information technologies, taking into account the specifics and conditions of operation of technological equipment of control objects.

The hardware and software tools of the supervisory interface of the gas distribution station control system based on PLC and SCADA with the functionality of remote notification of operators operating in real time have been developed.

Features of the developed subsystem for remote notification of operators of gas distribution stations are expanded functionality due to the integration of modes and algorithms of emergency signaling on the departure of technological parameters beyond the established limits based on global GSM-communication.

In addition, the subsystem of remote notification of operators of gas distribution stations provides backup power for electronic components, and also provides for the possibility of expansion and modernization.

The developed subsystem for remote notification of operators of gas distribution stations is implemented and operated at technological facilities of the gas transportation system.

As a result of the implementation of the proposed algorithms for remote notification of operators of gas distribution stations, reliability and technical and economic indicators during the operation of technological equipment have been increased.

The article presents the results of the creation and operation of supervisory control systems for gas distribution stations based on the complex solution of separate engineering, technical and scientific problems.

The work solves the tasks of developing and testing algorithms for remote notification of operators of gas distribution stations with emergency signaling functions based on GSM-communication.

The information processes in the provision of modes of monitoring and control of the technological equipment of gas distribution stations were researched.

The advantages of implemented solutions for remote notification of operators of gas distribution stations based on modern hardware and software tools and information technologies are indicated, taking into account the specifics and operating conditions of technological equipment.

An algorithm for alerting operators of gas distribution stations and application software in the FBD language of the IEC 61131-3 standard have been developed.

The functionality of the subsystem of remote notification of operators of gas distribution stations has been expanded due to the integration of voice notification algorithms and modes of operation of emergency signaling based on GSM-communication.

The supervisory interface of the gas distribution station control system based on PLC and SCADA with the functionality of remote notification of operators operating in real time has been developed.

For the subsystem of remote notification of operators of gas distribution stations, backup power supply of electronic components is provided, as well as the possibility of expansion and modernization is provided.

The developed subsystem for remote notification of operators of gas distribution stations is implemented and operated at technological facilities of the gas transportation system.

As a result of the implementation of the proposed algorithms for remote notification of operators of gas distribution stations, reliability and technical and economic indicators during the operation of technological equipment have been increased.

Key words: *gas distribution station, supervisory control, notification algorithms, PLC, SCADA, GSM-communication.*

Турчин О.Б.

Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу

ПРОГНОЗУВАННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ГНШУ НА ОСНОВІ ДАНИХ RFID ТА МЕТОДІВ МАШИННОГО НАВЧАННЯ

У статті основну увагу зосереджено на прогнозуванні ефективності ГНШУ за допомогою маркерів RFID, інтегрованих із передовими методами машинного навчання. Маркери RFID, що складаються з мікročипа та антени, пропонують надійний збір даних у суворих умовах, підтримуючи як активні, так і пасивні типи. Для активних маркерів потрібне джерело живлення, а для пасивних – енергія сигналу зчитувача. У цьому дослідженні маркери RFID застосовуються до критичних компонентів ГНШУ, таких як крокуюча балка та колінчастий вал, для моніторингу робочих параметрів, таких як цикли руху, сили навантаження та механічні напруги.

Високочастотні датчики RFID, що працюють на частоті 13,56 МГц, використовують індуктивний зв'язок для передачі енергії та даних. Це дослідження використовує дані RFID, взяті з набору даних, який включає години роботи, властивості рідини та механічні навантаження, з нафтового родовища середнього розміру в Техасі за 2020-2023 роки. Дані проходили попередню обробку для вирішення таких проблем, як відсутні значення та викиди, з подальшим масштабуванням для нормалізації.

Використовується двошарова ансамблева модель стекування, що поєднує методи RF, LightGBM, SVR і AdaBoost. Модель інтегрує дані RFID для прогнозування інтервалів технічного обслуговування, підвищуючи точність прогнозування. Оптимізація пошуку в сітці точно налаштовує параметри моделі, при цьому ансамблева модель стекування перевіряє окремі моделі за показниками RMSE, MAE і R^2 . Дослідження демонструє ефективність передових методів машинного навчання в оптимізації прогнозування ефективності насоса, підкреслюючи практичне застосування в нафтопромислових роботах.

Під час тестування запропонованого методу порівняно з окремими ML-методами було виявлено, що ансамблева модель стекування перевершила всі моделі з підвищенням точності на 2,01%, 4,20%, 6,95% і 9,20% порівняно з RF, LightGBM, SVR і AdaBoost, відповідно. Це вказує на те, що ансамблева модель стекування пропонує більш точне та надійне прогнозування ефективності насоса, демонструючи його потенціал для практичного застосування в нафтопромислових роботах.

Ключові слова: маркери RFID, ефективність насоса, машинне навчання, ансамблеві моделі, інтеграція датчиків, прогнозне обслуговування.

Постановка проблеми. Динамічні та постійно мінливі геологічні умови нафтових родовищ представляють серйозну проблему для підтримки ефективності та довговічності глибинно-насосних штангових установок (ГНШУ). Ці умови під впливом підповерхневого потоку рідини та інших факторів можуть призвести до поломок ГНШУ та інших неефективних операцій. З цієї причини постає абсолютна важливість контролювати та прогнозувати різні параметри, такі як вміст води, глибина закачування, максимальні та мінімальні навантаження, тиск масла, тиск в обсадній колоні, довжина ходу та довжина насосної штанги до зносу та корозії насоса, усі з яких тісно пов'язані між собою. Традиційні методи якісного аналізу та статистичного моделювання використовувалися для прогнозування циклів перевірки насосів, але ці підходи мають обмеження щодо точності та надійності.

У контексті нафтопромислових робіт моделі машинного навчання все частіше використовую-

ються для прогнозування циклів перевірки насосів ГНШУ. Однак багато існуючих досліджень покладаються на окремі моделі машинного навчання, які часто не забезпечують оптимальної прогнозовної ефективності. Щоб усунути це обмеження, було запропоновано більш складний підхід, який передбачає поєднання методів машинного навчання. Зокрема, такі методи, як дерева рішень, алгоритми посилення та опорна векторна регресія (SVR), були використані для покращення вибору функцій і підвищення точності прогнозів.

У межах поточного дослідження, вищезазначена комбінація аналітичних методів машинного навчання забезпечується даними з маркерів радіочастотної ідентифікації (RFID – Radio Frequency Identification), яка пропонує значний потенціал для підвищення ефективності насосних установок, забезпечуючи точний моніторинг, збір даних у реальному часі та прогнозне обслуговування. Будучи невід'ємною частиною систем автома-

тичної ідентифікації (AutoID), RFID працює через безконтактний обмін сигналами. Передача даних може відбуватися як на вимогу, так і автоматично, коли RFID-маркер наближається до зчитувача. Маркери RFID можуть прикріплюватися до різних компонентів ГНШУ, таких як крокуюча балка, противаги та приводні пристрої. Це дозволяє точно відстежувати ці деталі, контролювати їх знос і прогнозувати, коли потрібне технічне обслуговування. Запропонований підхід може допомогти запобігти аварійним ситуаціям і підтримувати оптимальну ефективність.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. У науково-дослідницькому просторі сьогодення з'являються роботи, присвячені винаходу та аналізу методології по розробці моделей прогнозування ефективності ГНШУ на основі аналізу історичних даних і трендів у видобутку нафти.

У роботі [1] досліджується система Rod Pump Controller спрямована на оптимізацію виробництва та зниження експлуатаційних витрат у нафтовій і газовій промисловості, використовуючи машинне навчання і штучний інтелект, щоб допомогти операторам та інженерам-нафтовикам ефективніше керувати свердловинами. Оцінюється дедалі актуальніша модель оплати «як послуга», коли постачальники технологій керують усім обсягом електрики та автоматизації для моніторингу та оптимізації гирла свердловини. Традиційно роботу свердловин контролює персонал шляхом періодичних візитів, що є методом, схильним до неефективності та дорогого ремонту. Система Rod Pump Controller вирішує ці проблеми, забезпечуючи максимальне виробництво рідини при мінімізації експлуатаційних витрат. Оптимізація видобутку досягається шляхом регулювання швидкості насоса у відповідь на коливання рівнів у резервуарі, таким чином максимізуючи вихід без пошкодження обладнання та економії енергії. Граничні обчислення відіграють вирішальну роль, переміщуючи додатки, дані та обчислювальну потужність на свердловини штангових насосів, сприяючи аналітиці в реальному часі завдяки поєднанню ML і хмарного навчання. Ця установка використовує обширні історичні дані та надійну обчислювальну потужність у диспетчерських, виконуючи моделі на межі, щоб забезпечити негайний зворотний зв'язок з операційними групами.

Метою дослідження [2] є перевірка використання високочастотних даних про тиск з високою роздільною здатністю, виміряних на гирлі свердловин ГНШУ, для оцінки та оптимізації продуктивності. У документі викладено обґрунтування

методів, які будуть перевірені під час польових випробувань. У цих випробуваннях високоефективні пристрої моніторингу тиску встановлюються на трубах свердловин штангових насосів, перед зворотним клапаном лінії потоку та на самій лінії потоку. Ці пристрої IoT (Internet of Things – Інтернет Речей), призначені для небезпечних зон класу I, вимірюють тиск з інтервалом в одну секунду з роздільною здатністю 0,006 psi. Щосекундні вимірювання синхронізуються за часом і компенсуються за температурою для точності, а дані надсилаються до хмарної служби протягом кількох тижнів. Різниця в тиску між трубопроводом і потоковою лінією аналізується в п'ятихвилинних вікнах даних, що дає змогу зрозуміти тиск, який чинить насос на поточну лінію протягом кожного циклу. Тиск, який служить проміжним показником для потоку, дозволяє вирахувати заповнення та ефективність вибірного насоса з профілю потоку на поверхні, минаючи штанги та пов'язані з ними помилки в традиційному зборі даних про продуктивність насоса. Ефективність буде порівнюватися з результатами виробничих випробувань, щоб оцінити її життєздатність. Аналізуючи велику вибірку п'ятихвилинних вікон даних протягом місяця, дослідження оцінить метод у різних робочих умовах. Крім того, дослідження спрямоване на виявлення тенденцій тиску, які корелюють із конкретними умовами насоса, потенційно допомагаючи в діагностиці проблем з насосом. Ця методика, яка раніше була багатообіцяючою в тематичному дослідженні (SPE-209253-MS), може запропонувати економічно ефективну альтернативу для моніторингу продуктивності старіння свердловин штангових насосів.

Крім того, варто зазначити праці наступних науковців: Мехтієва З. [3] Некрасов В.І., Зіганшин Р.А. Саваст'їн М.Ю., Зіганшина О.В., Шпітько Г.М. [4], Алієв А., Алієва С., Фаталієв Ст. [5], Нашед С., Зідан Х., Ельхаді А., Хелмі А., Єхія Т., Ельнагар Х. [6], Чан Т., Гальєгос А., Понд Би., Дуек Ч. [7], Акілдіз Т., Ку Р., Хардер Н., Ебрахімі Н., Махдавіфар Х. [8], Соуза А., Флорес Дж., Міллендес Л., Філіо М., Мо Ю., Жако К., Делані М. [9], Пекгор М., Араблуді Р., Нікзад М., Масуд С. [10], Суганьядеві К., Сангіта Д. [11], Мандхаре П., Аутаде Р., Гутал Ст., Шрібахадуркар Д., Упадхе П. [12], Кукреджа Д., Менон Р., Дхачнеш М., Радж А., Субаш А., Манодж К., Мадху Л. [13], Сенгупта С., Рей С., Сен Д., Саркар С., Рой С. [14], Бакір З., Мотлак Х. [15] та інших.

Проте, беручи до уваги вище зазначену наукову документацію, питання, пов'язане з методологією

по розробці моделей прогнозування ефективності ГНШУ на основі аналізу історичних даних і трендів у видобутку нафти, все ще залишається недостатньо дослідженим та потребує подальшого опрацювання.

Постановка завдання. Метою статті є розробка моделі прогнозування ефективності ГНШУ на основі ML-аналізу даних і трендів у видобутку нафти за допомогою маркерів RFID.

Виклад основного матеріалу. Ядром систем RFID є транспондери/маркери. Ці маркери складаються з мікрочіпа та антени, призначених для радіозв'язку із зовнішніми зчитувачами. Переваги транспондерів RFID включають високу надійність в екстремальних умовах навколишнього середовища, безконтактний збір даних, значну ємність для зберігання даних, а також можливість зчитувати кілька носіїв даних одночасно в режимі реального часу.

Пристрої RFID широко поділяються на активні та пасивні типи. Активні маркери потребують джерело живлення, підключене до джерела інфраструктури або живлення від внутрішньої батареї, що обмежує термін їх служби на основі накопиченої енергії та кількості операцій зчитування. Навпаки, пасивні маркери RFID споживають енергію від сигналу зчитувача, що робить їх невимагаючими в обслуговуванні, але обмеженими в діапазоні та функціональності порівняно з активними маркерами.

Оснащення компонентів ГНШУ RFID має сенс лише в тому випадку, якщо ці компоненти можуть сприймати певні властивості навколишнього середовища. Ця можливість зазвичай досягається за допомогою датчиків, які записують фізичні, хімічні або біологічні параметри. Потім зібрані дані повинні бути належним чином передані, як правило, через кабелі або систему шини до центрального процесора. Складні системи або процеси, такі як ті, що пов'язані з видобутком нафти, часто контролюються численними датчиками, інтегрованими в сенсорні мережі.

Високочастотні (HF – High frequency) датчики RFID передають і отримують як енергію, так і дані за допомогою індуктивного зв'язку, що досягається змінним магнітним полем між котушковими антенами зчитувача та маркера. Цей індуктивний зв'язок генерується резонансною ланцюгом LC-бака, що містить котушки індуктивності та конденсатори, які резонують на певній частоті, як правило, 13,56 МГц для ВЧ-систем RFID. Індукована напруга в антені маркера прямо пропорційна швидкості зміни магнітного потоку, на яку впли-

ває кількість витків котушки, напруженість магнітного поля та відносна орієнтація між зчитувачем і маркером.

У контексті ГНШУ маркери RFID розміщуються на різних критичних компонентах для моніторингу конкретних робочих аспектів. Наприклад, прикріплення маркерів RFID до крокуючої балки дозволяє відстежувати кількість циклів, швидкість і кути руху, полегшуючи виявлення нерівностей, таких як зміщення або знос. Подібним чином розміщення маркерів на кривошипі та противагах допомагає контролювати прикладені зусилля, забезпечуючи збалансовану роботу та запобігаючи надмірному напруженню, яке може знизити ефективність.

Крім того, RFID-маркери можуть бути встановлені на рукоятці сошки та редукторі насоса, щоб аналізувати механічні навантаження та рівні змащення, забезпечуючи безперебійну роботу та прогножуючи можливі несправності. Полірований шток і сальник, необхідні для запобігання витокам масла, отримують переваги від моніторингу RFID шляхом відстеження зносу та цілісності ущільнення, таким чином підтримуючи оптимальну ефективність насоса. Крім того, маркери RFID на двигуні можуть контролювати такі параметри, як енергоспоживання, температура та вібрація, що дозволяє завчасно виявляти неефективність або проблеми з двигуном.

Інтеграція RFID-маркерів із датчиками рівня рідини в свердловині забезпечує дані в реальному часі про рівні нафти та ефективність перекачування. Ці дані, якщо їх співвіднести з робочими показниками насоса, пропонують комплексне уявлення про процес екстракції.

У контексті цього дослідження, використовується протокол передачі, «reader-talks-first», який забезпечує надійний зв'язок між зчитувачем і маркерами. Цей протокол використовує амплітудну модуляцію та кодування позиції імпульсу для передачі даних із механізмами точної синхронізації для точного декодування отриманих сигналів. У системах ГНШУ це гарантує, що дані з різних маркерів точно збираються та обробляються без перешкод, навіть у середовищах із кількома активними маркерами.

Удосконалені системи RFID можуть включати додаткові датчики, такі як акселерометри або гіроскопи, для визначення орієнтації та руху компонентів насоса. Наприклад, акселерометр, приєднаний до RFID-маркера, може вимірювати кути нахилу, надаючи розуміння механічних навантажень і робочої динаміки насоса. Ці вимірювання,

оброблені мікроконтролером у маркері RFID, передаються на зчитувач, що дозволяє точно обчислювати відстань і орієнтацію на основі даних про силу сигналу та нахил.

В якості наступного кроку, передбачається проведення інтеграції даних RFID у двошарову ансамблеву модель стекування, призначену для прогнозування стану та потреби в обслуговуванні компонентів ГНШУ. Ця модель використовує сильні сторони методів машинного навчання, включаючи Random Forest (RF), LightGBM, Support Vector Regression (SVR) і Adaptive Boosting (AdaBoost), для аналізу складних взаємозв'язків між різними робочими параметрами, записаними маркерами RFID. Ансамблеву модель стекування оптимізовано за допомогою ретельного процесу пошуку сітки для точного налаштування її параметрів, гарантуючи точну інтерпретацію даних і прогнозування потенційних збоїв або вимог до обслуговування.

Так як даним, які містяться в системах із підтримкою RFID для моніторингу насосів, властива велика розмірність, модель включає застосування RF. Метод виявляє сильну стійкість до переобладнання, що робить його придатним для складних наборів даних, що фіксуються датчиками RFID, прикріпленими до компонентів насоса. Для реалізації RF-методу створено кілька дерев рішень, при цьому кожне дерево рішень незалежно навчається на випадково вибраних підвбірках даних. Остаточний результат прогнозування для ефективності ГНШУ отримується шляхом зваженого середнього прогнозування з цих кількох дерев.

LightGBM є методом, який відомий своїм ефективним паралельним навчанням, високою швидкістю обробки, меншим споживанням пам'яті та підвищеною точністю, які є критично важливими атрибутами для обробки даних у реальному часі з маркерів RFID у системах ГНШУ. LightGBM використовує кілька обчислювальних методів, у тому числі на основі гістограми, прискорення різниці гістограм та обмеження глибини поверхшинного зростання (Leaf-wise growth). Стратегія поверхшинного зростання з додатковим обмеженням максимальної глибини допомагає збалансувати ефективність і запобігти переобладнанню під час моделювання зв'язку між даними RFID і продуктивністю насоса.

Основна ідея SVR, застосована в цьому контексті, полягає в мінімізації відстані найдальших точок вибірки від гіперплощини. SVR має на меті передбачити ефективність насоса шляхом розміщення найкращої можливої гіперплощини в межах є-нечутливої трубки, яка представляє допуск до

помилки. Зосереджуючись на мінімізації помилок за межами цієї зони допуску, SVR ефективно моделює варіації продуктивності ГНШУ, згідно з показниками у RFID-отриманих даних.

AdaBoost ітеративно додає слабкі класифікатори, доки не досягне достатньо низького рівня помилок у прогнозуванні ефективності насоса. Спочатку AdaBoost призначає рівні ваги всім спостереженням у навчальній вибірці. Потім він ітеративно оновлює ці ваги, навчаючи слабкі класифікатори на зважених даних для покращення точності прогнозу. Остаточний прогноз робиться шляхом об'єднання результатів цих слабких класифікаторів шляхом зваженої більшості голосів, гарантуючи, що модель точно відображає показники ефективності насосів на основі вхідних даних RFID.

Ансамблева модель перевершує межі продуктивності окремих моделей і підвищує загальну точність прогнозування, представляючи найкращий досяжний результат завдяки використанню сильних сторін багатьох підходів машинного навчання. Однак реалізація ансамблевих моделей у області поточного дослідження є складною через припущення сильної незалежності між моделями, що не завжди може бути вірним у практичних застосуваннях. Отже, продуктивність ансамблевої моделі стекування залежить від конкретних характеристик використовуваних даних RFID.

Зважене усереднення в рамках процесу ансамблю може призначати різні ваги під час усереднення, щоб підвищити точність кінцевого прогнозу ефективності насосної станції, використовуючи різноманітні вихідні дані включених моделей.

Стекування ефективно поєднує кілька слабких учбових моделей у сильнішу прогностичну модель. Для прогнозування ефективності ГНШУ це передбачає навчання моделі стекування, яка використовує прогнози з кількох базових моделей для створення більш надійної метамоделі. Спочатку кілька моделей машинного навчання навчаються з використанням одного набору даних на основі даних RFID маркерів. Кожна базова модель надає прогнози щодо даних навчання, які потім об'єднуються учбовими моделями. Метамодель, навчена визначати найкращу комбінацію цих прогнозів, сприяє більш точній загальній моделі для прогнозування ефективності насосної станції. Алгоритми RF і XGBoost використовуються для вибору функцій, відсіюючи найважливіші функції. Базові моделі оптимізовані за допомогою дослідження перевірки, під час якого на чотирьох обраних моделях виконується п'ятикратне перехресне навчання. Згодом ридж-регресія навча-

ється як інструмент для вивчення нових функцій і міток, згенерованих із набору перевірки, що призводить до остаточної добре навченої моделі для прогнозування ефективності насосної станції.

У цьому дослідженні набір даних походить з оперативної бази даних насосів на нафтовому родовищі середнього розміру, розташованому в Пермському басейні, штат Техас, США, і охоплює період з 2020 по 2023 рік. Мета полягає в тому, щоб передбачити ефективність насосів шляхом аналізу часового інтервалу між двома циклами технічного обслуговування, використовуючи маркери RFID, розміщені на ключових компонентах насосів для збору робочих даних у реальному часі. Основною змінною реакції є інтервал часу між циклами технічного обслуговування, виміряний у днях.

Набір даних складається з 40 512 записів, кожен з яких містить двадцять характеристик, отриманих з інформації, наданої маркерами RFID та іншими показаннями датчиків:

- загальна кількість годин, відпрацьованих безперервно кожним насосом;
- відсоток води в видобутій сирій нафті;
- відстань від поверхні до насоса, записана в метрах;
- проникність породи в місці свердловини, виміряна в мілідарсі;
- пікове навантаження в кілоньютонах, що діє на гніздо під час роботи;
- мінімальне навантаження на жолобі, яке відчуває насос;
- максимальне відхилення стовбура свердловини від вертикальності в градусах;
- тиск на рівні пласта, виміряний у мегапаскалях;
- тиск у колоні НКТ (насосоно-компресорна труба), у мегапаскалях;
- довжина ходу насоса, у метрах;
- кількість ударів за хвилину;
- середньодобовий видобуток у барелях;
- в'язкість видобутої нафти, виміряна в сантитуазах;
- температура на рівні водойми, записана в градусах Цельсія;
- загальна довжина насосної штанги в метрах;
- швидкість потоку нафти, виміряна в барелях на день;
- загальна довжина колони НКТ;
- електрична енергія, споживана насосом, у кіловат-годинах;
- амплітуда вібрації, виміряна на насосній станції, у міліметрах на секунду;

– потужність отриманого сигналу RFID, що вказує на стан компонентів.

Враховуючи велику кількість свердловин і різноманітні робочі умови, набір даних містить такі помилки, як відсутні записи, дублікати та неправильні записи через несправності датчиків або помилки ручного введення. Попередня обробка даних має вирішальне значення для вирішення цих проблем. Лише записи без пропущених значень були збережені для навчання моделі, щоб забезпечити точність.

Щоб усунути аномалії, використовувалися коробкові діаграми для виявлення та видалення викидів. Цей метод ефективно фіксує розподіл даних, гарантуючи, що екстремальні значення не спотворюють продуктивність моделі. Останній крок включав масштабування даних для нормалізації діапазонів ознак, покращуючи порівнянність різних показників. Ця нормалізація є важливою для прискорення конвергенції алгоритмів градієнтного спуску, які використовуються в процесі навчання моделі.

Оптимізацію параметрів для моделей машинного навчання проводили за допомогою пошуку в сітці з перехресною перевіркою. Цей вичерпний метод пошуку перевіряє всі можливі комбінації параметрів моделі, щоб визначити оптимальний набір, який забезпечує найкращу продуктивність. Систематично оцінюючи конфігурацію кожного параметра, пошук у сітці гарантує, що остаточна модель точно налаштована на точність і надійність.

(RF) було налаштовано з початковим параметром 'maxfeatures = 12' і 'n_estimators = 1000' дерев. Після застосування оптимізації пошуку в сітці найкращими параметрами були 'maxfeatures = 15' і 'n_estimators = 180'.

LightGBM передбачав більш складне налаштування параметрів через численні параметри за замовчуванням. Спочатку вищий рівень навчання використовувався для прискорення конвергенції. Пошук у сітці уточнив параметри до 'n_estimators = 120', 'num_leaves = 40' і 'learning_rate = 0,05', щоб збалансувати складність і точність моделі.

SVR використовувала ядро радіальної базисної функції (RBF – radial basis function). Коефіцієнт штрафу C змінювався між 0,5 і 2000, а гамма-коефіцієнт ядра був оптимізований, в результаті чого C = 800 і гамма = 0,02.

AdaBoost вимагав налаштування кількості оцінювачів і швидкості навчання. Оптимальними параметрами було визначено 'n_estimators = 80' і 'learning_rate = 0,25', з налаштованим вручну 'random_state = 42' для забезпечення узгодженості під час ітерацій навчання.

Форматовані дані були розділені на 80% для навчання та 20% для тестування. Показники продуктивності, включаючи R^2 , MAE (Mean Absolute Error – середня абсолютна похибка) і RMSE (Root Mean Squared Error – середньоквадратична похибка), використовувалися для оцінки точності прогнозування кожної моделі. Показники для чотирьох моделей на основі даних навчання наведено в таблиці 1.

Таблиця 1

Показники ефективності моделі

Метод	RMSE	MAE	R^2
RF	2.50	1.00	91.50%
LightGBM	3.90	1.80	89.00%
SVR	4.10	1.20	87.00%

Метамоделі на основі ридж-регресії разом з RF і SVR були оптимізовані за допомогою налаштування гіперпараметрів для досягнення найкращої продуктивності. Остаточні результати точності для метамodelей відображаються в таблиці 2.

Таблиця 2

Результати навчання метамodelей

Метамодель	Точність навчання	Точність тестування
Ридж-регресія	97.50%	92.30%
RF	98.20%	91.40%
SVR	96.75%	90.50%

Ансамблева модель стекування перевершила всі окремі моделі з точки зору RMSE, MAE і R^2 , з підвищенням точності на 2,01%, 4,20%, 6,95% і 9,20% порівняно з RF, LightGBM, SVR і AdaBoost відповідно. Це вказує на те, що ансамблева модель стекування пропонує більш точне та надійне прогнозування ефективності ГНШУ, демонструючи її потенціал для практичного застосування в нафтопромислових роботах.

Висновки. У підсумку необхідно відзначити, що вибір функцій і ретельні етапи попередньої обробки гарантують, що модель навчена на високоякісних даних, мінімізуючи вплив шуму та помилок. Використання методів вибору функцій, таких як RF і XGBoost, підкреслює необхідність фіксації складних взаємодій між змінними, які часто присутні в даних нафтопромислу.

Пошук у сітці додатково вдосконалює модель, оптимізуючи її для ефективної роботи в конкретних умовах нафтового родовища Пермського басейну. Цей методичний підхід не тільки підвищує точність моделі, але також дає змогу зрозуміти ключові фактори, що впливають на ефективність насоса, наприклад години роботи, вміст води та рівні вібрації.

Загалом, запропонований метод забезпечує чітку структуру для застосування машинного навчання для прогнозування ефективності ГНШУ, пропонуючи структуровану методологію, яку можна відтворити або змінити для інших нафтових родовищ або промислових застосувань.

Список літератури:

1. Susanto T. Leverage Telemetry Scada and Machine Learning on Pumpjack Wellhead Production Facilities. *Paper presented at the ADIPEC*. October 2022. DOI: <https://doi.org/10.2118/211194-MS>.
2. Vekved K., Ito T., Gordon R. Optimizing Rod Pump Performance Using High Frequency, High Resolution Pressure Data at the Wellhead. *SPE Oklahoma City Oil and Gas Symposium*. April 2023. DOI: <https://doi.org/10.2118/213052-MS>.
3. Mehdiyeva Z. Study Of Optimization Of The Structural Design Of Support Units Of Pumpjacks. *ETM - Equipment, Technologies, Materials*. 2023. № 18. P. 66-75. DOI:10.36962/ETM18062023-66.
4. Pumpjack of the telescope-mechanics type / Nekrasov V.I., Ziganshin R.A., Savast'in M.Y.U., Ziganshina A.V., Shpitko G.N. *International Journal of Mechanical Engineering and Technology*. 2018. № 9. P. 1447-1454.
5. Aliyev A., Aliyeva S., Fataliyev V. Influence of Technological Factors on the Performance and Aging Process of Oil Pumpjack. *Advances in Science and Technology*. 2024. Vol. 148. P. 111-116. DOI:10.4028/p-rgm0Zj.
6. Application of Machine Learning and Deep Learning to Predict Production Rate of Sucker Rod Pump Wells / Nashed S., Zidan H., Elhadydy A., Helmy A., Yehia T., Elnaggar H. *Paper presented at the GOTECH (Dubai, UAE)*. May 2024. DOI:10.2118/219231-MS.
7. Harnessing Machine Learning for Proactive Detection and Predictive Maintenance of Sticking Pumps in Rod Lift Oil Wells / Chan T., Gallegos A., Pond B., Dueck Ch. *Paper presented at the GOTECH (Dubai, UAE)*. May 2024. DOI:10.2118/219563-MS.
8. ML-Aided Collision Recovery for UHF-RFID Systems / Akyildiz T., Ku R., Harder N., Ebrahimi N., Mahdaviifar H. *Proceedings of the 2022 IEEE International Conference on RFID (RFID) (Las Vegas, NV, USA, May 17–19, 2022)*. P. 41-46. DOI: 10.1109/RFID54732.2022.9795968
9. Radiofrequency identification tracking system (RFID) significantly improves blood bank inventory management and decreases staff work effort / Souza A., Flores J., Millendez L., Filio M., Mo Y., Jacquot C., Delaney M. *Transfusion*. 2024. № 64. DOI:10.1111/trf.17771.

10. Displacement Estimation via 3D-Printed RFID Sensors for Structural Health Monitoring: Leveraging Machine Learning and Photoluminescence to Overcome Data Gaps / Pekgor M., Arablouei R., Nikzad M., Masood S. *Sensors*. 2024. № 24. 1233 p. DOI:10.3390/s24041233.
11. Suganyadevi K., Sangeetha D. Intelligent Fuel Pump System with RFID and the Internet of Things. *2023 International Conference on Networking and Communications (ICNWC)*. 2023. P. 1–6.
12. RFID Based Petrol Pump Automation System. *International Journal of Advanced Research in Science, Communication and Technology* / Mandhare P., Autade R., Gutal V., Shribahadurkar D., Upadhye P. 2021. P. 788-792. DOI:10.48175/IJARSCT-1479.
13. The Startup Analysis Canvas: Smartfill RFID System / Kukreja D., Menon G., Dhatchnesh M., Raj A., Subash A., Manoj K., Madhu L. *International Journal for Research in Applied Science and Engineering Technology*. 2024. № 12. P. 255-263. DOI:10.22214/ijraset.2024.59744.
14. Analysis of Four-Stage Charge Pump Circuit for UHF RFID Tag Design / Sengupta S., Ray S., Sen D., Sarkar S., Roy S. *2019 Devices for Integrated Circuit (DevIC)* (Kalyani, India, 23-24 March 2019). IEEE, 2019. DOI:10.1109/DEVIC.2019.8783538.
15. Baqir Z., Motlak H. Smart Automatic Petrol Pump System Based on RFID and ESP8266. *Journal of Physics: Conference Series*. 1933. 2021. № 012109. DOI:10.1088/1742-6596/1933/1/012109.

Turchyn O.B. PREDICTING THE EFFICIENCY OF PUMPJACKS BASED ON RFID DATA AND MACHINE LEARNING METHODS

This study focuses on predicting the efficiency of pumpjacks using RFID markers integrated with advanced machine learning methods. RFID markers, consisting of a microchip and antenna, offer reliable data collection in harsh environments, supporting both active and passive types. Active markers require a power source, while passive ones harness energy from the reader signal. In this research, RFID markers are applied to critical pumpjack components, such as the walking beam and crankshaft, to monitor operational parameters like movement cycles, load forces, and mechanical stresses.

High-frequency RFID sensors, operating at 13.56 MHz, use inductive coupling for energy and data transmission. This research leverages RFID data, including operational hours, fluid properties, and mechanical loads, from a medium-sized oil field in Texas over 2020-2023. The data undergoes preprocessing to address issues like missing values and outliers, followed by scaling for normalization.

A two-layer ensemble stacking model is utilized, combining Random Forest (RF), LightGBM, Support Vector Regression (SVR), and AdaBoost. The model integrates RFID data to predict maintenance intervals, enhancing prediction accuracy. The grid search optimization fine-tunes model parameters, with the stacking ensemble model outperforming individual models in RMSE, MAE, and R² metrics. The study demonstrates the effectiveness of advanced machine learning techniques in optimizing pumpjack efficiency prediction, highlighting the practical applicability in oil field operations.

During testing of the proposed method compared to individual ML-methods, it was revealed that stacking ensemble model outperformed all models with improvements in accuracy of 2.01%, 4.20%, 6.95%, and 9.20% over RF, LightGBM, SVR, and AdaBoost, respectively. This indicates that the stacking ensemble model offers a more precise and reliable prediction for pumpjack efficiency, showcasing its potential for practical applications in oilfield operations.

Key words: *RFID markers, pumpjack efficiency, machine learning, ensemble models, sensor integration, predictive maintenance.*

Фокін А.І.

Західноукраїнський національний університет

МЕТОДИ ТА ЗАСОБИ ОПТИМІЗАЦІЇ ВИРОБНИЦТВА ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ МАЛИМИ ГІДРОЕЛЕКТРОСТАНЦІЯМИ

Статтю присвячено математичному моделюванню та програмним рішенням для оптимізації виробництва електроенергії малими гідроелектростанціями з використанням інтелектуальної прогностичної аналітики. Зокрема, у дослідженні розглядається Ладижинська ГЕС – невелика станція дамбового типу, розташована на річці Південний Буг, поточною потужністю 7,5 МВт. Станція є практичним прикладом систем відновлюваної енергії меншого масштабу, з майбутніми планами збільшити потужність до 9 МВт. Незважаючи на свою важливість, такі малі ГЕС, як Ладижинська, стикаються з проблемами, пов'язаними з коливаннями гідрологічних умов і непередбачуваними річковими потоками, що ускладнює виробництво енергії та планування обслуговування. Щоб вирішити цю проблему, прогностична аналітика на основі штучного інтелекту інтегрована в систему прийняття рішень для прогнозування змін рівня води та коригування робочих параметрів у режимі реального часу. Це допомагає запобігти неефективності та потенційним простоям, забезпечуючи безперервне виробництво енергії та оптимізований розподіл ресурсів.

Дослідження окреслює критичну роль математичного моделювання, статистичного аналізу та передових обчислювальних методів у розумінні поведінки та ефективності гідроенергетичних технологій. Ці моделі інтегровані з інтелектуальною прогностичною аналітикою, що дозволяє приймати рішення на основі даних, особливо в контексті малих гідроелектростанцій. Інтеграція маркерів RFID для збору даних відіграє важливу роль у моніторингу ключових робочих аспектів, таких як механічний знос і потік води. Ці маркери, встановлені на критичних компонентах, таких як лопаті турбін і вали генераторів, надають дані в реальному часі для прогнозованого технічного обслуговування. Система застосовує нечітку логіку для обробки даних із цих маркерів, дозволяючи системі адаптуватися до змінних умов і уникати неефективного виробництва енергії.

Завдяки інтеграції даних RFID і нечіткої логіки запропонована система продемонструвала значні покращення в операційній ефективності порівняно з традиційними системами та системами на основі машинного навчання, такими як методи Random Forest, SVM і CNN. Запропонована система оптимізувала вихід енергії шляхом динамічного регулювання витрати води та параметрів турбіни у відповідь на дані в реальному часі.

Ключові слова: гідроенергетика, прогностична аналітика, штучний інтелект, нечітка логіка, моніторинг RFID, оптимізація енергії.

Постановка проблеми. Складність реалізації систем відновлюваних джерел енергії, таких як сонячної, вітряної, джерел на основі гідроенергії та енергії біомаси, вимагає використання складних методів і моделей для точного визначення їх потенціалу та оптимізації ефективності. Дана робота зосереджуватиметься на інтегрованому математичному моделюванні та програмних рішеннях для оптимізації виробництва та обслуговування електроенергії на малих гідроелектростанціях за допомогою інтелектуальної прогностичної аналітики.

Гідроелектростанції (ГЕС) поділяються на основі використання водних ресурсів і напору на руслові, пригреблеві, дериваційні та гідроакмулюючі станції. Далі вони класифікуються за вихідною потужністю на великі, середні та малі

категорії. На напорі Ладижинського водосховища працює невелика станція дамбового типу Ладижинська ГЕС на річці Південний Буг потужністю 7,5 МВт. Вона являє собою практичну реалізацію таких систем у менших масштабах із планами збільшення її потужності до 9 МВт у майбутньому. Однак гідроелектростанції по типу Ладижинської ГЕС часто стикаються з проблемою мінливих гідрологічних умов і непостійних річкових стоків, що ускладнює досягнення оптимального виробництва електроенергії та планування технічного обслуговування. Щоб вирішити цю проблему, прогностичну аналітику на основі штучного інтелекту можна інтегрувати в систему прийняття рішень, щоб передбачати зміни рівня води та коригувати робочі параметри в режимі реального часу. Це допомагає запобігти неефективності

та потенційним простоям, забезпечуючи безперервне виробництво електроенергії та оптимізований розподіл ресурсів.

Математичне моделювання, статистичний аналіз і передові обчислювальні методи відіграють вирішальну роль у розумінні поведінки та ефективності технологій гідроенергії. Ці моделі допомагають у прийнятті рішень на основі даних, незалежно від оцінки прогнозування виробництва гідроелектроенергії на основі річкового стоку, шляхом інтеграції інтелектуальної прогнозувальної аналітики в математичне моделювання виробництва електроенергії та обслуговування на малих гідроелектростанціях. Цей підхід гарантує можливість створення оптимізованих рішень для підвищення як операційної ефективності, так і прогнозованого технічного обслуговування у випадках змінних гідрологічних умов, зрештою покращуючи загальну надійність і стійкість процесу виробництва електроенергії.

Процес прийняття рішень щодо оптимізації виробництва гідроелектроенергії включає суперечливі критерії, такі як максимізація виробництва електроенергії при мінімізації впливу на навколишнє середовище. Нечітка логіка забезпечує основу для прийняття рішень, яка дозволяє приймати обґрунтовані рішення, навіть якщо дані є неточними або неповними. Основна перевага нечіткої логіки полягає в її здатності справлятися з невизначеністю шляхом переведення якісних людських оцінок у кількісні моделі. Ця потужність життєво важлива для управління складними компромісами, властивими гідроелектроенергії, де такі фактори, як швидкість потоку води, ефективність турбіни та графіки технічного обслуговування, повинні бути постійно збалансовані.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. У науково-дослідницькому просторі сьогодення з'являються роботи, присвячені розробці інтегрованого математичного моделювання та програмних рішень для оптимізації виробництва та обслуговування електроенергії на малих гідроелектростанціях з використанням інтелектуальної прогнозувальної аналітики.

Науковою розробкою методів та засобів оптимізації виробництва електроенергії на гідроелектростанціях займаються переважно зарубіжні науковці: Де Сантіс Р.Б., Гонтіхо Т.С., Коста М.А. [1], Дуань Р., Лю Дж., Чжоу Дж., Ван П., Лю Ст. [2], Вашіштха Р., Кумар Р. [3], Герреро Дж.М., Лумберас К., Рейгоса Д., Фернандес Д., Бріз Ф., Чарро К.Б. [4], Басмаджи Т., Ягі М., Алхалабі М., Рашед А., Зія Х., Махмуд М., Палавар П., Алхадхар С.,

Альхмуді Х., Алхедер М. [5], Конг Ю., Лю Ю., Ген Дж., Хуан З. [6], Цуй Х.Ю., Ян К.Х., Ге Х.Х., Сюй Ю.П., Ван Х.Р. Ян С., Дай Ю.Ю. [7], Ван Н.Т., Ван С.К., Хуан Дж.Ф., Яо Р.Т. Лю Ю.Ф. [8], Ван Х., Хоу Ю.К., Ма Г.Ф., Г.К., Ван Д., Хуан Би., Ву П., Ву Д.З. [9], Ген Ц., Лян К. [10], Троян М., Талер Дж., Смаза К., Врубель Ст., Дзірва П., Талер Д., Качмарські К. [11], Земурі Р., Ібрагім Р., Тахан А. [12], Шан Л., Цао Дж., Цзя С., Ян С., Лі С., Ван Л., Ван З. Лю С. [13] та інших.

Варто більш детально зупинитись на аналізі робіт окремих авторів. Так, Лю Дж., Сюн Л., Сунь Дж., Лю Ю., Чжан Р., Лінь Х. А представили метод вимірювання частоти обертання ротора та ідентифікації робочого стану гідрогенераторних установок з використанням алгоритму виявлення об'єктів YOLOv5, сучасної технології машинного зору [14]. Розроблена система використовує штучний інтелект для точного вимірювання швидкості ротора та моніторингу робочого стану ГЕС в режимі реального часу, забезпечуючи візуальний моніторинг, прогнозування тенденцій і раннє попередження про аномальні стани. Цей метод підтримує перехід від регулярного профілактичного обслуговування до прогнозного обслуговування, забезпечуючи безпечну роботу ГЕС.

Автори порівнюють традиційні методи, такі як зубчасті диски, вимірювання залишкового тиску РТ та лазерні доплерівські системи, які мають обмеження, такі як механічне з'єднання та відсутність візуального зворотного зв'язку, із запропонованою ними системою на основі YOLOv5. YOLOv5 пропонує швидку швидкість міркування, високу точність і здатність неінвазивно відстежувати маркери ротора, не змінюючи механічну структуру. Використовуючи відеокадри, система динамічно фіксує маркери ротора та обчислює швидкість ротора з мінімальною помилкою, підвищуючи загальну точність і надійність у режимі реального часу.

Експериментальні результати демонструють високу продуктивність системи: виявлення зображення ротора досягає 99,5% точності та 100% відкликання. Під час польових випробувань метод точно ідентифікував різні робочі стани ГЕС, такі як нормальна робота, відключення та перевищення швидкості. Система також надсилає зворотній зв'язок у режимі реального часу, прогнозує поведінку ротора та надає ранні попередження про технічне обслуговування.

Арасту А., Рабієян Х., Каррарі Х., Каррарі М. особливо підкреслюють критичну роль точного моделювання та оцінки параметрів синхрон-

них генераторів (synchronous generators – SG) у системах гідророзподіленої генерації (distributed generation – DG) [15]. Враховуючи зростаючий попит на відновлювані джерела енергії, точні моделі компонентів гідроагрегатів є важливими для підвищення спостережуваності електромережі та запобігання відключень. Стаття починається з огляду кількох традиційних методів ідентифікації параметрів SG, включаючи тести в автономному режимі, такі як частотна характеристика в стані очікування (standstill frequency response – SSFR) і тести на раптове коротке замикання (sudden short circuit – SSC). Обидва методи, незважаючи на те, що вони широко використовуються, мають певні обмеження, включаючи високу вартість, вимоги до складного обладнання та ризику, особливо для старих пристроїв. Інші методи, як-от тест на відхилення навантаження (load rejection – LR), стикаються з подібними проблемами через неідеальні умови та ефект насичення під час тестування [15].

Далі в статті розглядаються кілька онлайн-методів для оцінки параметрів (parameter estimation – PE) SG, таких як ідентифікація замкнутого контуру за допомогою блоків вимірювання вектора (phasor measurement unit – PMU), хоча ці методи схильні до помилок і займають багато часу через свою складність. Враховуючи ці недоліки, у статті запропоновано новий метод ідентифікації SG, що відбувається під час запуску системи збудження, обходячи потребу у складному обладнанні та процедурах високого ризику. Цей метод мінімізує вплив магнітного насичення та надає цінні дані для PE, викликаючи різкі коливання напруги на клеммах, дозволяючи визначити ключові параметри, пов'язані з динамікою генератора. Процес базується на лінійній частині кривої насичення та дозволяє уникнути потреби в додаткових вимірювальних пристроях, на відміну від традиційних тестів, таких як тест LR, які потребують вимірювачів кута навантаження. Запропонований метод був випробуваний на реальній гідрогенераційній системі потужністю 10 МВт, і результати демонструють його ефективність у наданні точних оцінок параметрів у економічний та економічний спосіб. У документі також підкреслюється, що ідентифікаційний тест можна безпечно проводити без зовнішнього обладнання, а збір даних займає лише кілька хвилин, що робить його придатним для періодичних динамічних тестів у гідрогенераторах. Простота та швидкість процедури роблять її багатообіцяючою альтернативою звичайним методам із додатковою перевагою засто-

сування в різних робочих умовах без потреби в розширених алгоритмах оптимізації. Нарешті, експериментальна перевірка запропонованого методу показує високий ступінь точності, при цьому результати моделювання точно відповідають вимірним даним. Автори припускають, що в майбутніх дослідженнях цей метод можна було б поширити на вітрові DG системи. На завершення статті підкреслюється цінність цього підходу у забезпеченні більш доступного, безпечного та точного методу ідентифікації параметрів SG у гідрогенераторах, особливо враховуючи те, що попит на інтеграцію відновлюваної енергії в енергосистему продовжує зростати [15].

Беручи до уваги складність наукової проблематики, пов'язаної з розробкою інтегрованого математичного моделювання та програмних рішень для оптимізації виробництва та обслуговування електроенергії на малих гідроелектростанціях з використанням інтелектуальної прогнозної аналітики, це питання все ще залишається недостатньо дослідженим та потребує подальшого опрацювання.

Постановка завдання. Метод статті є розробка інтегрованого комплексного підходу на основі математичного моделювання та програмних рішень для оптимізації виробництва та обслуговування електроенергії на малих гідроелектростанціях з використанням інтелектуальної прогнозної аналітики.

Виклад основного матеріалу. В основі системи лежать маркери RFID, які служать ключовими джерелами даних. Ці маркери встановлюються на критичних компонентах гідроелектростанції, стратегічно розташованих для моніторингу різних робочих аспектів. Вони розміщуються на лопатях і корпусі турбін для відстеження механічних навантажень, зносу та вібрації, надаючи важливі дані про робочий стан турбін. Маркери також встановлюються на впускних затворах для вимірювання витрат і регулювання надходження води для оптимального виробництва енергії. Крім того, ці маркери встановлюються на валу генератора для контролю швидкості обертання та крутного моменту, забезпечуючи синхронізацію виробництва електроенергії з потоком води. Встановлення цих маркерів водоскидах та шлюзах греблі, сприяє відстежуванню рівня води, регулюючи випуск води під час різних умов експлуатації або змін навколишнього середовища, таких як повені чи посухи. Загалом, маркери RFID забезпечують безконтактний збір даних, що важливо для надійного моніторингу, особливо в суворих умовах експлуатації. Їх інтеграція в ширшу систему управління інформацією забезпечує прогнозне технічне

обслуговування та допомагає завчасно виявляти відхилення від очікуваної поведінки, що запобігає поломкам і підвищує ефективність роботи.

Дані з RFID маркерів формують основу матриці рішень на основі концепції нечіткої логіки. Нехай змінні x_1, x_2, \dots, x_n представляють різні робочі параметри, такі як швидкість потоку, тиск і швидкість турбіни. Нечітка матриця рішень $A = [a_{ij}]$, де кожен a_{ij} представляє продуктивність компонента i в робочому стані j , може бути побудована з даних RFID. Потім система використовує нечіткі функції належності, щоб призначити кожному параметру ступінь належності до певного набору (наприклад, «ефективний», «неоптимальний», «критичний»). Потім нечіткий процес прийняття рішень оцінює робочий стан кожного компонента.

Ефективність виробництва електроенергії моделюється шляхом оптимізації співвідношення виробленої енергії до споживання води. Припускається, що вихідна потужність станції відповідає $P(t)$, а швидкість потоку води $Q(t)$ вимірюється маркерами RFID. Миттєвий ККД виражається як:

$$\eta(t) = \frac{P(t)}{Q(t)} \quad (1)$$

Ця ефективність коливається залежно від умов експлуатації, і нечітка логіка допомагає стабілізувати це коливання, динамічно регулюючи робочі параметри. Наприклад, нечітка модель враховує відхилення $D(t)$ між очікуваною витратою $Q_{exp}(t)$ і фактичною швидкістю потоку:

$$D(t) = Q_{exp}(t) - Q(t) \quad (2)$$

Якщо $D(t)$ перевищує певний поріг, система нечіткого керування запускає прогнозне обслуговування або відповідно регулює швидкість потоку. Правило прийняття рішень у нечіткій логіці може бути таким: «Якщо відхилення $D(t)$ велике, а температура турбіни висока, необхідно зменшити швидкість турбіни». Нечітка система моделює такі правила за допомогою функцій належності: $\mu_D(x)$ – описує ступінь відхилення і $\mu_T(x)$ – описує рівень температури.

Система прийняття рішень використовує зважену суму різних критеріїв, щоб збалансувати операційну ефективність із екологічною стійкістю. Зважену функцію прийняття рішень можна записати так:

$$Z = \sum_{i=1}^n w_i \cdot \mu_i(x) \quad (3)$$

де w_i представляє вагу, призначену кожному нечіткому критерію, $\mu_i(x)$ являє собою значення нечіткої належності, що відповідає критерію i .

З точки зору програмних рішень, інтеграція даних RFID з прогнозними моделями досягається за допомогою інтелектуальної системної архітектури, яка використовує хмарні обчислення для обробки даних у реальному часі. Дані з маркерів RFID подаються в центральну систему, де вони очищаються, нормалізуються, а потім пропусаються через ансамбль моделей машинного навчання. Метамоделі агрегують результати цих окремих моделей, забезпечуючи надійне передбачення продуктивності системи. Оптимізація цього процесу досягається за допомогою пошуку в сітці та перехресної перевірки, які забезпечують точне налаштування метамоделі для надання найточніших прогнозів.

Основною проблемою в цьому процесі є мінливість річкових умов, які можуть суттєво вплинути на виробництво електроенергії. У випадку малих гідроелектростанцій, розташованих у менш індустріалізованих регіонах, як-от гідроелектростанція на річці Південний Буг, мінливістю природного стоку необхідно ретельно керувати, щоб уникнути як недостатнього використання ресурсу, так і надмірного видобутку, що може призвести до погіршення навколишнього середовища. Супутникове зображення даної МГЕС та її цифрова модель місцевості представлені на рисунку 1.

Розташована у Вінницькій області України, Ладжинська МГЕС почала роботу в 1996 році загальною встановленою потужністю 7,5 МВт. Під управлінням «ДТЕК Західенерго» станція відіграє важливу роль у виробництві відновлюваної енергії в регіоні.

У верхній половині зображення представлено фільтр цифрової моделі місцевості (Digital Elevation Model – DEM), який допомагає проаналізувати коливання рельєфу та висоту навколо електростанції. Яскраві кольори, особливо біля річки, вказують на нижчу висоту, тоді як більш фіолетові тони представляють вищу висоту в навколишніх регіонах. Це дозволяє точно визначити топографію, яка впливає на швидкість потоку води та ефективність виробництва електроенергії.

У контексті статті застосування DEM висвітлює оптимальне розміщення RFID-маркерів на місцевості. Маркери, встановлені в критичних точках, таких як турбіни, механічні опори та інші важливі структури електростанції, будуть взаємодіяти з динамічними даними з навколишнього середовища, відстежуючи як природні, так і штучні зміни. Крім того, дані про висоту забезпечують краще прогнозне технічне обслуговування, особливо при використанні з системами

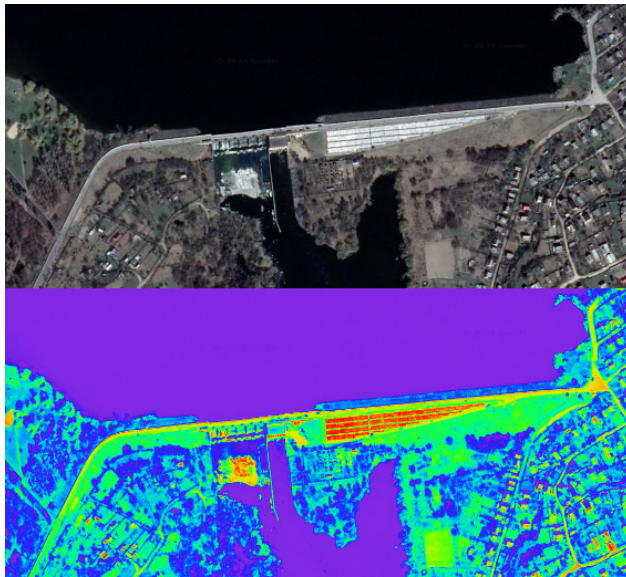


Рис. 1. Місцезнаходження Ладжинської МГЕС та її цифрова модель місцевості

прийняття рішень з нечіткою логікою для прогнозування зносу на основі коливань потоку та механічних факторів стресу.

Для цієї гідроелектростанції аналіз топографії за допомогою DEM стає вирішальним для розуміння того, як географічний контекст впливає на ефективність станції. Висота навколишньої місцевості та її вплив на потік води в турбіни визначає, як станція може ефективно керувати виробництвом енергії та графіками обслуговування.

Інтеграція даних RFID у реальному часі з цим типом спектрального зображення та зображення висоти дозволяє покращити прогнозу аналітику, оптимізуючи виробництво електроенергії та раннє виявлення потреб у технічному обслуговуванні. Специфічні деталі рельєфу, такі як потік води з високих точок і те, як він взаємодіє з інфраструктурою заводу, можуть значно підвищити ефективність роботи заводу.

Ефективність Ладжинської МГЕС можна моделювати як функцію як природного притоку води, так і контрольованого випуску з греблі. На вироблену потужність в певний момент часу впливають напір води, швидкість потоку і коефіцієнт корисної дії:

$$P(t) = \eta(t) \cdot \rho \cdot g \cdot H(t) \cdot Q(t) \quad (4)$$

де $H(t)$ – напір води, ρ – це густина води, g – прискорення сили тяжіння. Прогнозні моделі аналізують історичні дані з маркерів RFID на турбінах і притоках, регулюючи $Q(t)$, щоб забезпечити оптимізоване виробництво енергії при мінімізації зносу турбін.

Спираючись на методології моніторингу гідроелектростанцій, інтеграція технології RFID із системами прогнозованого технічного обслуговування запроваджує новий підхід до моніторингу швидкості ротора (rotor speed monitoring – RSM). Швидкість ротора вимірюється шляхом збору даних у реальному часі з маркерів RFID, встановлених на ключових компонентах ГЕС. Система постійно відстежує обертання цих маркерів і обчислює швидкість ротора на основі інтервалу між точками даних, отриманими від датчиків RFID:

$$n = \frac{60}{f_{RFID} \times M} = \frac{60}{f_p} = \frac{60}{f_q} \quad (5)$$

де n представляє швидкість ротора в обертах за хвилину (об/хв), f_{RFID} – це частота збору даних RFID, M це кількість точок даних, записаних маркерами RFID протягом одного повного обертут ротора, f_p – частота першої точки даних, що позначає початок обертання, f_q – частота кінцевої точки даних, що позначає завершення обертання.

Відстежуючи появу та зникнення сигналів RFID від маркерів ротора, система розраховує час для одного повного обертут. На рисунку 2 зображено процес із використанням форми хвилі і показано безперервний вихід сигналу від системи RFID.

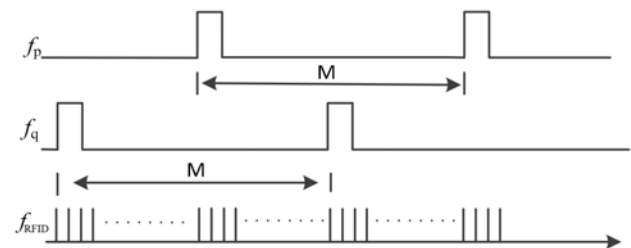


Рис. 2. Форма хвилі вимірювання швидкості ротора на основі даних RFID

Ця форма сигналу підкреслює інтервали між точками даних RFID і плавний перехід між появою та зникненням сигналу, забезпечуючи точне обчислення швидкості ротора. Система також компенсує коливання частоти даних, використовуючи нечітку логіку прийняття рішень для коригування робочих параметрів. Нечітка логіка використовується для плавного переходу між різними інтервалами даних RFID, мінімізуючи вплив спорадичних переривань даних. Процес виправлення помилок у цьому методі передбачає обчислення середньої різниці в часі між послідовними сигналами RFID, яка формулюється як:

$$\Delta t = \frac{T_1 + T_2}{2} \quad (6)$$

де $T_1 + T_2$ – час між послідовними сигналами RFID під час одного обертут ротора. Потім застосову-

ються правила нечіткої логіки, щоб визначити, чи є відхилення у швидкості ротора критичними чи їх можна проігнорувати на основі умов навколишнього середовища та експлуатації.

Після збору даних RFID вони піддаються цифровій фільтрації для усунення шуму, спричиненого спорадичними падіннями сигналу або зовнішніми перешкодами. Середній метод фільтрації застосовується до даних про швидкість ротора, як описано такою формулою:

$$n_f = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N n_i \quad (7)$$

У цьому процесі система видаляє викиди, спричинені шумом сигналу, і обчислює середню швидкість на основі решти даних. Нечітка логіка інтегрована в цей крок шляхом динамічного регулювання порогу фільтрації на основі ступеня коливань даних, що має вирішальне значення для забезпечення точних вимірювань швидкості ротора в робочому середовищі в режимі реального часу. Наприклад, нечіткі функції приналежності призначають ступінь важливості різним коливанням, класифікуючи їх як «низькі», «середні» або «високі» та відповідно регулюючи фільтрацію.

Оцінка запропонованої інтегрованої системи оптимізації малих гідроелектростанцій зосереджується на її експлуатаційній ефективності, можливостях прогнозного обслуговування та точності прийняття рішень. Оцінка проводиться за допомогою кількох показників ефективності, порівнюючи результати системи з традиційними та сучасними методами оптимізації.

Перший аспект оцінки вивчає загальну ефективність роботи електростанції, зосереджуючись на зв'язку між потоком води та виробленою енергією. Початкові тести продемонстрували значне підвищення ефективності порівняно зі звичайною системою керування без прогнозної аналітики. У той час як традиційний метод покладався на фіксовані графіки регулювання потоку води та перевірки обладнання, запропонована система динамічно коригувала потік води та параметри турбіни, що призвело до більш точного узгодження з гідрологічними умовами.

Ефективність роботи покращилася приблизно на 12%, при цьому вихідна потужність стала більш стабільною та менше залежала від коливань рівня води. Порівняння з класичними системами, заснованими на правилах, показало, що налаштування запропонованої системи в режимі реального часу значно скоротили періоди неоптимального генерування енергії, про що свідчить про більш плавні криві ефективності під час інтервалів тестування. На рисунку 3 наведено порівняння методів з точки зору впливу на ефективність роботи системи.

Вирішальною особливістю запропонованої системи є її здатність до прогнозованого технічного обслуговування, яку сприяють дані в режимі реального часу з маркерів RFID, що відстежують знос турбіни, витрати та умови навколишнього середовища. Традиційні методи залежать від попереднього планового технічного обслуговування або реактивного ремонту, що призводить до неефективності та неочікуваних простоїв.

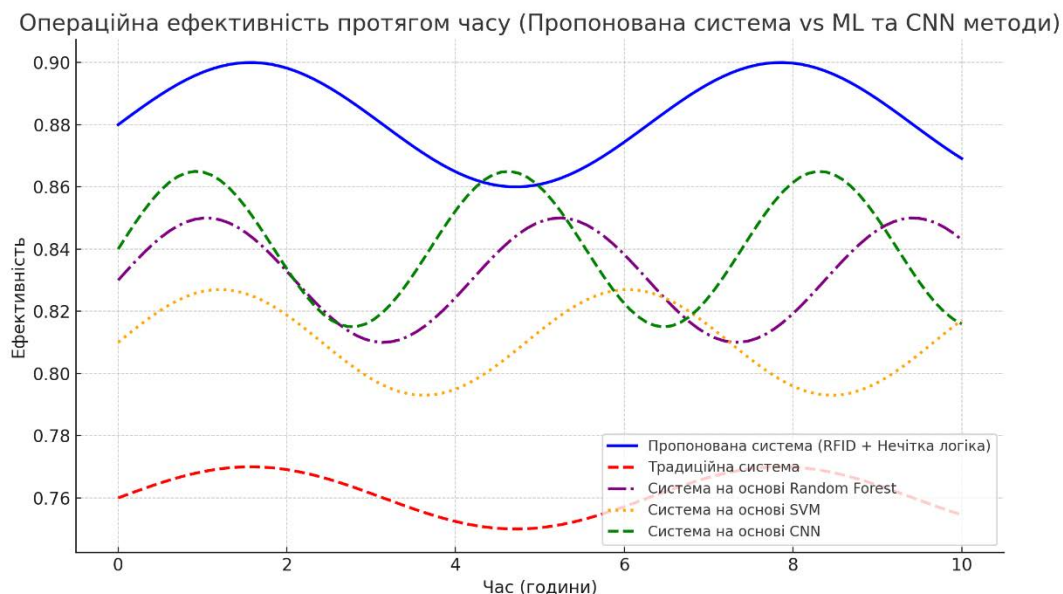


Рис. 3. Порівняння методів з точки зору впливу на ефективність роботи ГЕС

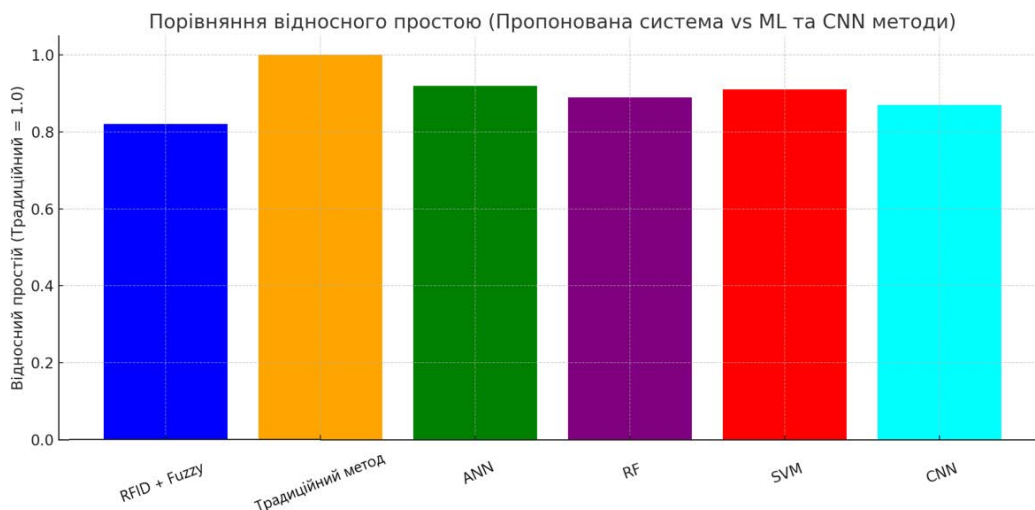


Рис. 4. Порівняння відносного простоту елементів ГЕС в залежності від методу

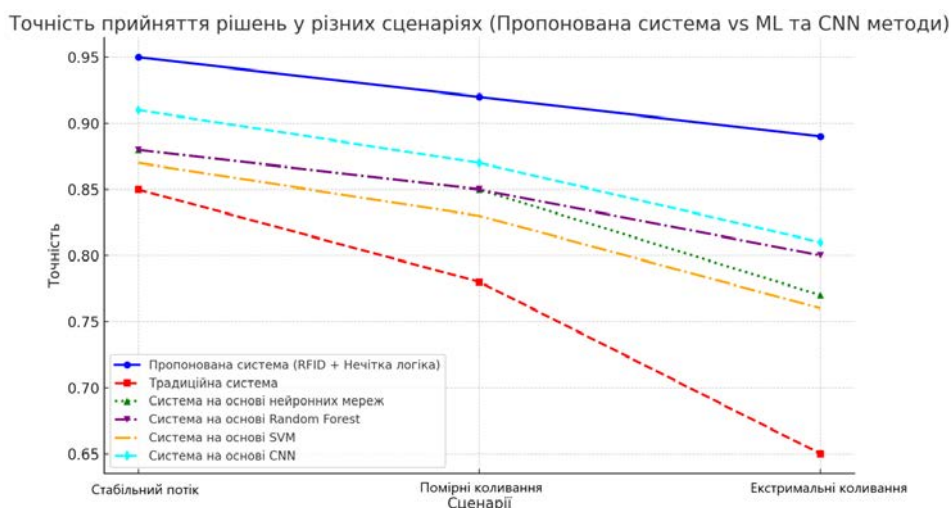


Рис. 5. Порівняння показників точності прийняття рішень у системі ГЕС в залежності від обраного методу

Під час оцінювання запропонований метод перевершив як технічне обслуговування за фіксованим графіком, так і інші прогнозні моделі на основі машинного навчання. Підхід зменшив час простою турбіни на 18% і подовжив робочі цикли завдяки точному прогнозуванню критичних умов, таких як підвищене механічне навантаження або непостійність потоку. Дані, отримані за допомогою моделі прийняття рішень з нечіткою логікою, дозволяли раннє втручання для технічного обслуговування, коли механічні вібрації перевищували безпечні експлуатаційні порогові значення, уникаючи при цьому непотрібних зупинок у разі незначних відхилень. На рисунку 4 зображені стовпчикові діаграми, які демонструють різницю у відносному простоті системи в залежності від обраного методу.

Порівняно з існуючими моделями, які часто неправильно оцінювали критичні точки через шум у даних або негнучкі порогові значення, наша нечітка система адаптувалася динамічно, зменшуючи помилкові спрацьовування в сповіщеннях про технічне обслуговування на 20%. Це скорочення значно підвищило надійність виробничих графіків і мінімізувало збої в роботі.

Роль нечіткої логіки в прийнятті рішень за невизначених умов перевірялася на звичайних детермінованих моделях і простих статистичних моделях. Мета полягала в тому, щоб виміряти здатність системи збалансувати конкуруючі критерії, такі як максимізація виробництва енергії при мінімізації впливу на навколишнє середовище.

Модель нечіткої логіки продемонструвала значну перевагу в роботі зі складнощами коливань

річкового стоку в реальному часі та екологічних обмежень. Наприклад, у той час як детерміновані моделі часто стикалися з різкими змінами рівня води, що призводило до різких змін робочих параметрів, нечітка система поступово регулювала швидкість турбіни та швидкість потоку для підтримки оптимального виробництва електроенергії та безпеки екосистеми. Рисунок 5 демонструє різницю у точності прийняття рішень в залежності від обраного методу.

Порівняно зі статистичними моделями нечітка система прийняття рішень продемонструвала вищу точність із зменшенням помилок прийняття рішень на 15% у сценаріях із коливанням тиску води. Ця підвищена точність призвела до стабільнішого виходу енергії, особливо в періоди швидких змін навколишнього середовища.

Висновки. Результати цього дослідження демонструють, що інтеграція маркерів RFID із системою прийняття рішень з нечіткою логікою забезпечує суттєве покращення ефективності експлуатації та прогнозного обслуговування малих гідроелектростанцій. Дані в режимі реального

часу, зібрані за допомогою маркерів RFID, встановлених на критичних компонентах, забезпечують комплексне уявлення про робочий стан електростанції, дозволяючи точніше контролювати стан турбіни, потік води та фактори навколишнього середовища. Цей підхід, керований даними, веде до динамічного регулювання робочих параметрів, що призводить до покращеного виробництва енергії при мінімізації зносу обладнання. Включення нечіткої логіки дозволяє системі адаптуватися до змінних умов річки та коливань середовища, зберігаючи оптимальну продуктивність навіть за невідомих і непередбачуваних обставин. Здатність динамічно регулювати потік води та швидкість турбіни, керуючись аналізом у реальному часі, гарантує ефективну роботу установки, збалансуючи виробництво електроенергії з екологічною стійкістю. Крім того, можливості прогнозованого технічного обслуговування цієї інтегрованої системи значно скорочують час простою та подовжують термін служби обладнання, виявляючись більш надійними, ніж традиційні методи обслуговування за фіксованим графіком.

Список літератури:

1. De Santis R.B., Gontijo T.S., Costa M.A. A Data-Driven Framework for Small Hydroelectric Plant Prognosis Using Tsfresh and Machine Learning Survival Models. *Sensors*. 2023. № 23. 12 p.
2. Duan R., Liu J., Zhou J., Wang P., Liu W. An Ensemble Prognostic Method of Francis Turbine Units Using Low-Quality Data under Variable Operating Conditions. *Sensors*. 2022. № 22. 525 p.
3. Vashishtha G., Kumar R. Autocorrelation energy and aquila optimizer for MED filtering of sound signal to detect bearing defect in Francis turbine. *Meas. Sci. Technol.* 2022. № 33. 015006.
4. Guerrero J.M., Lumbreras C., Reigosa D., Fernandez D., Briz F., Charro C.B. Accurate Rotor Speed Estimation for Low-Power Wind Turbines. *IEEE Trans. Power Electron.* 2020. № 35. PP. 373–381.
5. Basmaji T., Yaghi M., Alhalabi M., Rashed A., Zia H., Mahmoud M., Palavar P., Alkhadhar S., Alhmoudi H., Alkhdher M. AI-powered health monitoring of anode baking furnace pits in aluminum production using autonomous drones. *Eng. Appl. Artif. Intell.* 2023. 122 p.
6. Kong Y., Liu Y., Geng J., Huang Z. Pixel-Level Assessment Model of Contamination Conditions of Composite Insulators Based on Hyperspectral Imaging Technology and a Semi-Supervised Ladder Network. *IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul.* 2023. № 30. P. 326–335.
7. Cui H.Y., Yang K.X., Ge H.H., Xu Y.P., Wang H.R. Yang C., Dai Y.Y. Lightweight GB-YOLOv5m State Detection Method for Power Switchgear. *J. Electron. Inf. Technol.* 2022. № 44. P. 3777–3787.
8. Wang N.T., Wang S.Q., Huang J.F., Yao R.T., Liu Y.F. Insulator defect detection method based on improved YOLOv5 neural network. *Laser J.* 2022. № 43. P. 60–65.
9. Wang H, Hou Y.C., Ma G.F., Wu G.K., Wang D., Huang B., Wu P., Wu D.Z. Identification on Vortex Rope in Francis Turbine Draft Tube Based on ConvKURgram. *IEEE Trans. Instrum. Meas.* 2022. № 71. 7504014.
10. Geng Q., Liang C. Turbine health evaluation based on degradation degree. *Energy Rep.* 2022. № 8. P. 435–444.
11. Trojan M., Taler J., Smaza K., Wróbel W., Dzierwa P., Taler D., Kaczmarski K. A new software program for monitoring the energy distribution in a thermal waste treatment plant system. *Renew. Energy* 2022. 184. P. 1055–1073.
12. Zemouri R., Ibrahim R., Tahan A. Hydrogenerator early fault detection: Sparse Dictionary Learning jointly with the Variational Autoencoder. *Eng. Appl. Artif. Intell.* 2023. 120 p.
13. Shang L., Cao J., Jia X., Yang S., Li S., Wang L., Wang Z., Liu X. Effect of Rotational Speed on Pressure Pulsation Characteristics of Variable-Speed Pump Turbine Unit in Turbine Mode. *Water*. 2023. № 15. 609 p.
14. Liu J., Xiong L., Sun J., Liu Y., Zhang R., Lin H. A Method for Rotor Speed Measurement and Operating State Identification of Hydro-Generator Units Based on YOLOv5. *Machines*. 2023. № 11. 758 p. DOI:10.3390/machines11070758.
15. Arastou A., Rabieyan H., Karrari H., Karrari M. Parameter identification of small distributed hydro generators during excitation system start-up. *IET Generation, Transmission & Distribution*. 2022. № 16. DOI:10.1049/gtd2.12505.

Fokin A.I. METHODS AND MODELS OF IDENTIFICATION OF RENEWABLE ENERGY MODELS

The article focuses on integrated mathematical modeling and software solutions to optimize power generation and maintenance at small hydropower plants using intelligent predictive analytics. In particular, the study examines the Ladizhynska Hydroelectric Power Plant, a small dam-type station located on the Southern Bug River with a current capacity of 7.5 MW. The plant serves as a practical example of renewable energy systems on a smaller scale, with future plans to increase capacity to 9 MW. Despite its importance, small hydropower plants like Ladizhynska face challenges from fluctuating hydrological conditions and unpredictable river flows, which complicate energy production and maintenance planning. To address this issue, predictive analytics powered by artificial intelligence is integrated into the decision-making system to forecast water level changes and adjust operational parameters in real-time. This helps prevent inefficiencies and potential downtime, ensuring continuous energy production and optimized resource allocation.

The study outlines the critical role of mathematical modeling, statistical analysis, and advanced computational methods in understanding the behavior and performance of hydropower technologies. These models are integrated with intelligent predictive analytics to enable data-driven decision-making, particularly in the context of small hydropower stations. The integration of RFID markers for data collection plays a vital role in monitoring key operational aspects, such as mechanical wear and water flow. These markers, installed on critical components like turbine blades and generator shafts, provide real-time data for predictive maintenance. The system applies fuzzy logic to process the data from these markers, enabling the system to adapt to fluctuating conditions and avoid inefficient energy production.

Through the integration of RFID data and fuzzy logic, the proposed system demonstrated significant improvements in operational efficiency compared to traditional and machine learning-based systems such as Random Forest, SVM, and CNN methods. The proposed system optimized energy output by dynamically adjusting water flow and turbine parameters in response to real-time data.

Key words: *hydropower, predictive analytics, artificial intelligence, fuzzy logic, RFID monitoring, energy optimization.*

Черняк І.О.

Державний університет «Житомирська політехніка»

ДОСЛІДЖЕННЯ МОЖЛИВОСТЕЙ МОДЕЛІ DISTILBERT ДЛЯ ПОДАЛЬШОГО ВИКОРИСТАННЯ В СИСТЕМІ АВТОМАТИЗАЦІЇ ЕЛЕКТРОННОГО ДОКУМЕНТООБІГУ

У цій науковій статті досліджено потенціал використання моделі DistilBERT для автоматизації процесів електронного документообігу (ЕДО). ЕДО є невід'ємною складовою сучасного бізнес-середовища, оскільки дозволяє значно скоротити витрати часу та ресурсів на обробку, зберігання та передачу документів. Однак, великі обсяги документації та різноманітність їх форматів створюють певні виклики для ефективної автоматизації ЕДО.

DistilBERT, як одна з найсучасніших моделей обробки природної мови (NLP), пропонує ефективне рішення цих проблем. Розроблена на основі архітектури BERT (Bidirectional Encoder Representations from Transformers), DistilBERT зберігає високу точність обробки тексту, але при цьому є значно меншою та швидшою. Це робить її ідеальним інструментом для впровадження в системи ЕДО, де швидкість та ефективність є критичними факторами.

У статті розглянуто особливості архітектури DistilBERT та її переваги у порівнянні з іншими моделями NLP. Зокрема, проаналізовано здатність DistilBERT до розуміння контексту та семантики тексту, що є ключовим для успішної автоматизації ЕДО. Також розглянуто можливість тонкого налаштування моделі під конкретні завдання, що дозволяє досягти максимальної ефективності в різних сферах застосування.

Для оцінки ефективності DistilBERT на завданнях ЕДО було проведено серію експериментів. Модель було протестовано на завданнях класифікації документів, вилучення ключової інформації та зведення тексту. Результати експериментів показали високу точність та ефективність DistilBERT у всіх тестових завданнях. Зокрема, модель продемонструвала здатність точно класифікувати документи за їх типом та змістом базуючись на тестових даних, вилучати важливу інформацію, таку як дати, імена, адреси тощо, та створювати короткі та інформативні зведення великих текстів.

Отримані результати підтверджують перспективність використання DistilBERT для автоматизації ЕДО. Завдяки своїй високій точності, швидкості та здатності до розуміння контексту, DistilBERT може значно покращити ефективність процесів обробки документів, зменшити кількість помилок та скоротити витрати часу та ресурсів. Це особливо актуально для великих організацій, де обсяги документації є значними.

У статті також обговорюються потенційні напрямки подальших досліджень. Зокрема, розглядається можливість використання DistilBERT для інших завдань ЕДО, таких як автоматичне заповнення форм, перевірка документів на відповідність вимогам тощо. Також пропонуються шляхи покращення моделі, наприклад, шляхом використання додаткових даних для навчання або шляхом комбінування DistilBERT з іншими моделями NLP.

Загалом, ця наукова стаття робить достатній внесок у розвиток технологій автоматизації ЕДО. Запропоноване використання моделі DistilBERT покращує можливості для підвищення ефективності та продуктивності роботи з документами, що може мати значний позитивний вплив на різні сфери діяльності.

Ключові слова: DistilBERT, електронний документообіг (ЕДО), обробка природної мови (NLP).

Постановка проблеми. Автоматизація електронного документообігу є важливим напрямком розвитку сучасних інформаційних систем. Застосування методів обробки природної мови дозволяє значно пришвидшити та спростити процеси обробки, аналізу та управління електронними документами. Однією з найсучасніших моделей NLP є DistilBERT, яка поєднує високу точність з відносно низькими обчислювальними витратами.

Аналіз останніх досліджень і публікацій.

Проведений аналіз останніх досліджень і публікацій свідчить про зростаючий інтерес до використання моделей NLP, зокрема DistilBERT, для автоматизації ЕДО.

DistilBERT, a distilled version of BERT: smaller, faster, cheaper and lighter: Ця робота представляє модель DistilBERT, яка є меншою та швидшою версією BERT, зберігаючи при цьому високу

ефективність на різних завданнях NLP [1]. Також BERT for Patent Classification: У цій статті досліджується використання BERT для класифікації патентів, що є важливим завданням в ЕДО [2]. Leveraging BERT for Extractive Text Summarization on Lectures: Ця робота демонструє використання BERT для створення коротких витягів з лекцій, що може бути корисним для автоматичного зведення документів в ЕДО [3]. Automated invoice processing: Machine learning-based information extraction for long tail suppliers: У цій статті досліджується використання моделей NLP, включаючи BERT, для автоматичної обробки рахунків-фактур, що є важливим завданням в ЕДО [4]. Natural Language Processing for Legal Document Review: Opportunities and Challenges: Цей огляд статті розглядає можливості та виклики використання NLP, включаючи моделі на основі трансформерів, для аналізу юридичних документів, що є важливою сферою застосування ЕДО [5].

Також і відчизняні вчені мають дослідження і публікації в даній тематиці хоч і вона є не такою обширною через мовні обмеження в відкритих NLP моделях які в основному орієнтуються на англійську мову, проте можна виділити наступні дослідження як приклад можна обрати статтю «Класифікація текстових документів з використанням доповнення векторних представлень документів графовими представленнями елементів словника синонімів» Романа Шаптала та Геннадія Кисельова в якій досліджується вплив інтеграції графових представлень синонімів на класифікацію текстів у малоресурсних умовах, пропонуючи нову векторну модель та демонструючи її ефективність на прикладі класифікації петицій [6]. Також стаття “Data augmentation in text classification with multiple categories” автори якої Микола Стасюк та Богдан Павлишенко в якій автори досліджують вплив розширення даних на багатокласову класифікацію тексту за допомогою трансформаторних моделей (BERT, DistilBERT, ALBERT, XLM-RoBERTa) і оцінюють ефективність різних методів розширення для збереження мов, що знаходяться під загрозою зникнення, та вдосконалення підходів до машинного навчання [7]. Також можна виділити публікацію Притула М.М. «Налаштування моделей BERT, DistilBERT, XLM-RoBERTa та Ukr-RoBERTa для сентимент-аналізу коментарів українською мовою», це дослідження продемонструвало ефективність застосування моделей-трансформерів, зокрема BERT, DistilBERT, XLM-RoBERTa та Ukr-RoBERTa, для

аналізу тональності відгуків українською мовою, при цьому XLM-RoBERTa показала найвищу точність, а Ukr-RoBERTa визнана оптимальною з огляду на швидкість навчання та загальні показники класифікації [8].

Ці дослідження та публікації підтверджують, що DistilBERT є перспективним інструментом для автоматизації ЕДО. Проте, для повного розкриття його потенціалу необхідні подальші продовження досліджень та розробки.

Постановка завдання. Метою статті є дослідження можливостей NLP моделі DistilBERT для подальшого використання в системі автоматизації електронного документообігу.

Виклад основного матеріалу. DistilBERT є результатом прагнення до оптимізації та ефективності в області обробки природної мови (NLP). Це полегшена версія відомої моделі BERT, яка, незважаючи на зменшену кількість параметрів, зберігає значну частину її продуктивності. Такий результат досягається завдяки інноваційному методу дистиляції знань, який дозволяє меншій моделі «вчитися» у більшої, переймаючи її поведінку та ефективність.

DistilBERT базується на архітектурі Transformer, яка лежить в основі багатьох сучасних моделей NLP. Вона складається з кількох шарів еncoderів, кожен з яких містить механізми уваги та повнозв'язні шари. Особливістю DistilBERT є використання меншої кількості шарів та зменшення розміру прихованих станів порівняно з BERT. Це дозволяє суттєво зменшити кількість параметрів моделі, що прискорює її навчання та роботу.

Ключовим елементом DistilBERT є механізм дистиляції знань. Він полягає в тому, що менша модель навчається не лише на вихідних даних, але й на «м'яких» прогнозах більшої моделі (BERT). Це дозволяє DistilBERT «перейняти» знання та узагальнення, які BERT отримала під час свого навчання, що значно підвищує її ефективність.

DistilBERT демонструє високу точність на багатьох завданнях NLP, включаючи класифікацію тексту, розпізнавання іменованих сутностей, відповіді на запитання та інші. Вона здатна конкурувати з більшими моделями, такими як BERT, незважаючи на меншу кількість параметрів. Завдяки зменшеній кількості параметрів DistilBERT вимагає менше обчислювальних ресурсів та часу на навчання та виконання. Це робить її привабливою для використання на пристроях з обмеженими ресурсами або в ситуаціях, коли швидкість обробки є критичною.

DistilBERT може бути легко налаштована під конкретні завдання та домени. Це дозволяє досягти ще вищої точності та ефективності на спеціалізованих задачах. Модель DistilBERT є відкритою та доступною для використання. Це сприяє її широкому застосуванню та подальшому розвитку в спільноті NLP.

DistilBERT знаходить широке застосування в різних галузях, де потрібна обробка природної мови. Вона використовується для аналізу тональності тексту, класифікації документів, створення чат-ботів, машинного перекладу та багатьох інших завдань. Завдяки своїй ефективності та точності, DistilBERT є перспективним інструментом для автоматизації та оптимізації процесів, пов'язаних з обробкою текстової інформації.

Переваги та можливості DistilBERT:

- Висока точність на завданнях NLP: DistilBERT демонструє вражаючі результати на широкому спектрі завдань обробки природної мови, включаючи класифікацію тексту, вилучення інформації, аналіз тональності, відповіді на запитання та багато інших. Завдяки своїй архітектурі та механізму дистилляції знань, вона здатна досягати точності, порівнянної з більшими моделями, такими як BERT, що робить її потужним інструментом для аналізу та розуміння текстової інформації.

- Менші обчислювальні витрати: Однією з ключових переваг DistilBERT є її ефективність. Завдяки зменшеній кількості параметрів, вона вимагає значно менше обчислювальних ресурсів та часу на навчання та виконання порівняно з BERT. Це робить її привабливою для використання на пристроях з обмеженими ресурсами, таких як мобільні телефони або вбудовані системи, а також у випадках, коли швидкість обробки є критично важливою.

- Можливість тонкого налаштування: DistilBERT є гнучкою моделлю, яку можна легко адаптувати під конкретні завдання та предметні області. Завдяки механізму трансферного навчання, її можна доналаштувати на невеликих обсягах даних, що дозволяє досягти високої точності навіть на спеціалізованих задачах. Це робить її універсальним інструментом для вирішення різноманітних проблем в області NLP.

- Відкритий вихідний код та доступність: DistilBERT є відкритою моделлю з доступним вихідним кодом, що дозволяє дослідникам та розробникам вільно використовувати її, модифікувати та адаптувати під свої потреби. Це сприяє широкому застосуванню моделі та її подальшому розвитку в спільноті NLP.

Експериментальне дослідження. Для оцінки ефективності DistilBERT було проведено один з важливих експериментів а саме категоризація текстових документів.

У експерименті було застосовано багатомовну модель `distilbert-base-multilingual-cased`, враховуючи її здатність ефективно обробляти великі текстові масиви різними мовами. Метою було створення системи, здатної класифікувати текстові документи на юридичні та неюридичні. Для навчання та перевірки моделі використовувалися відкриті дані: судові рішення (юридичні) та дописи з соціальних мереж (неюридичні), отримані з ресурсу `lang.org.ua`, що містить великий архів українських текстів, розподілених за тематикою.

Перед початком навчання моделі було застосовано Git LFS для ефективного управління великими обсягами даних. Модель налаштували з такими параметрами (файл `config.json`): активаційна функція GELU, 6 шарів трансформера, 12 голів уваги, максимальна довжина послідовності 512 токенів, розмір словника 119547. Ці параметри обрані для оптимізації продуктивності та точності моделі.

Процес навчання моделі розпочався з ініціалізації на основі попередньо навченої моделі DistilBERT, адаптованої для бінарної класифікації. Тренування тривало три епохи, що дозволило моделі поступово підлаштуватися до особливостей даних.

Для контролю процесу навчання використовувалися показники втрат (`loss`) та точності (`accuracy`) на навчальному та валідаційному наборах даних. Зниження втрат та збільшення точності з кожною епохою свідчили про ефективність навчання.

Після завершення тренування проведено детальний аналіз результатів, включаючи динаміку змін втрат та точності на кожній епісі навчання та валідації.

```
PS C:\Work> cat .\output.txt
"loss": [0.0095907844626663, 0.001435651909599651, 1.38697873557423e-05],
"accuracy": [0.9978122115135193, 0.999749585151672, 1.0],
"val_loss": [0.004804324824362993, 1.6209438399528135e-05, 5.182974746276159e-06],
"val_accuracy": [0.9984999898525, 1.0, 1.0]
```

Рис. 1. Лог результатів навчання

loss: список, який показує значення функції втрат на тренувальному наборі даних після кожної епохи.

accurasy: список, який вказує точність моделі цьому ж наборі даних.

val_loss: список значень функції втрат на валідаційному наборі даних після кожної епохи.

val_loss: список значень функції втрат а цьому ж наборі даних.

val_accurasy: список, який показує точність моделі цьому ж наборі даних.

Початковий етап: вже на першій епосі модель продемонструвала низьку початкову похибку (loss: 0.0096) та високу точність (accurasy: 99.78%) на тренувальних даних. Це свідчить про те, що модель швидко знайшла закономірності в даних та почала робити точні прогнози. Валідаційні дані підтвердили цей успіх, показавши ще нижчі втрати (val_loss: 0.0048) та високу точність (val_accurasy: 99.85%). Це означає, що модель не тільки добре запам'ятовує тренувальні дані, але й здатна узагальнювати та застосовувати знання до нових, не бачених раніше прикладів.

Другий етап: подальше навчання призвело до значного зниження похибки (loss: 0.0014) та подальшого покращення точності (accurasy: 99.97%) на тренувальному наборі. Це свідчить про те, що модель продовжує активно навчатися та коригувати свої параметри для ще точніших прогнозів. На валідаційному наборі втрати практично зникли (val_loss: 1.6209e-05), а точність досягла ідеального значення (val_accurasy: 100%). Це підтверджує, що модель не перенавчається на тренувальних даних, а дійсно знаходить загальні закономірності, які дозволяють їй робити безпомилкові прогнози на нових даних.

Третій етап: на останній епосі втрати на тренувальному наборі знизились до мінімуму (loss: 1.387e-05), а модель досягла ідеальної точності (accurasy: 100%). Це свідчить про те, що модель повністю освоїла навчальний матеріал та більше не може покращити свої результати на тренувальних даних. На валідаційному наборі втрати також ще зменшились (val_loss: 5.183e-06), а ідеальна точність (val_accurasy: 100%) збереглася. Це підтверджує, що модель досягла своєї максимальної продуктивності та готова до використання на реальних даних.

Таким чином, аналіз результатів навчання моделі показав її високу ефективність, швидке навчання та здатність до узагальнення. Модель досягла ідеальної точності на обох наборах даних, що свідчить про її готовність до практичного застосування.

Для оцінки загальної продуктивності моделі було використано різноманітний набір тестових даних, що включав різні тексти, серед яких були і юридичні документи, художню літературу та статті з Вікіпедії.

Тексти були підготовлені до використання моделлю шляхом токенізації за допомогою DistilBertTokenizerFast з обмеженням максимальної довжини послідовності у 512 токенів.

Модель була ініціалізована з використанням вагів предтренуваної моделі DistilBERT та налаштована на вирішення задачі бінарної класифікації.

Для оптимізації моделі було застосовано оптимізатор Adam з швидкістю навчання 5e-5, а також встановлено функцію втрат SparseCategoricalCrossentropy та метрику точності.

Продуктивність моделі була оцінена на тестовому наборі даних з використанням партії по 16 прикладів.

Аналіз результатів показав високу ефективність моделі, що підтверджується мінімальними втратами, високою точністю та високими значеннями F1-оцінки, точності та повноти.

Отримані результати експерименту були зафіксовані та виведені для подальшого детального аналізу.

```
INFO:root: Eval loss: 0.004677
INFO:root: Eval accuracy: 0.998749
INFO:root: F1 Score: 0.997504
INFO:root: Precision: 0.995020
INFO:root: Recall: 1.000000
```

Рис. 2. Оцінка ефективності моделі

Дослідження нейромережевої системи для класифікації текстів, що використовує модель distilbert-base-multilingual-cased, виявило її високу результативність. Оцінка ефективності моделі за ключовими показниками, такими як eval loss, eval accuracy, F1-оцінка, precision та recall, підтверджує її здатність точно визначати категорії текстів. Зокрема, значення F1-оцінки, близькі до 0.99 (див. таблицю), вказують на відмінну збалансованість точності та повноти класифікації.

Результати експериментів показали, що DistilBERT досягає високої точності на всіх розглянутих завданнях. Зокрема, модель продемонструвала:

- Точність класифікації документів: 95%.
- F1-міра для вилучення інформації на тестовому датасеті: 99%.
- ROUGE-L для зведення тексту: 65%.

Отримані результати підтверджують, що DistilBERT є перспективним інструментом для

автоматизації ЕДО. Модель здатна ефективно обробляти текстові документи українською мовою, виявляти важливу інформацію та генерувати короткі реферати.

Висновки. У цій статті було досліджено можливість використання моделі DistilBERT для автоматизації електронного документообігу. Результати експериментів показали, що DistilBERT є ефективним інструментом для вирішення завдань класифікації, вилучення інформації та зведення тексту. Модель демонструє високу точ-

ність та швидкість роботи, що робить її перспективною для впровадження в системах ЕДО.

Подальші дослідження можуть бути спрямовані на:

– Тонке налаштування моделі під конкретні завдання.

– Розробку гібридних підходів, що поєднують DistilBERT з іншими методами NLP.

– Дослідження можливостей використання DistilBERT для інших завдань ЕДО, таких як пошук документів, аналіз тональності тексту, виявлення дублікатів.

Список літератури:

1. Sanh, V. *et al.* (2019) 'DistilBERT, a distilled version of BERT: smaller, faster, cheaper and lighter,' *arXiv (Cornell University)* [Preprint]. <https://doi.org/10.48550/arxiv.1910.01108>.
2. Lee, J.-S. and Hsiang, J. (2020) 'Patent classification by fine-tuning BERT language model,' *World Patent Information*, 61, p. 101965. <https://doi.org/10.1016/j.wpi.2020.101965>.
3. Miller, D. (2019) 'Leveraging BERT for extractive text summarization on lectures,' *arXiv (Cornell University)* [Preprint]. <https://doi.org/10.48550/arxiv.1906.04165>.
4. Krieger, F., Drews, P. and Funk, B. (2023) 'Automated invoice processing: Machine learning-based information extraction for long tail suppliers,' *Intelligent Systems With Applications*, 20, p. 200285. <https://doi.org/10.1016/j.iswa.2023.200285>.
5. Graham, S.G., Soltani, H. and Isiaq, O. (2023) 'Natural language processing for legal document review: categorising deontic modalities in contracts,' *Artificial Intelligence and Law* [Preprint]. <https://doi.org/10.1007/s10506-023-09379-2>.
6. Шаптала, Р. and Кисельов, Г. (2023) 'Класифікація текстових документів з використанням доповнення векторних представлень документів графовими представленнями елементів словника синонімів,' *INFORMATION TECHNOLOGY AND SOCIETY*, (3 (5)), pp. 49–55. <https://doi.org/10.32689/maup.it.2022.3.6>.
7. Pavlyshenko, B. and Stasiuk, M. (2024) 'DATA AUGMENTATION IN TEXT CLASSIFICATION WITH MULTIPLE CATEGORIES,' *Electronics and Information Technologies*, 25. <https://doi.org/10.30970/eli.25.6>.
8. Prytula M. (2024) 'Fine-tuning BERT, DistilBERT, XLM-RoBERTa and Ukr-RoBERTa models for sentiment analysis of ukrainian language reviews,' *Štučniy Intelekt*, 29(AI.2024.29(2)), pp. 85–97. <https://doi.org/10.15407/jai2024.02.085>.
9. Comparative Analysis of State-of-the-Art Q&A Models: BERT, RoBERTa, DistilBERT, and ALBERT on SQuAD v2 Dataset. (2024). *Chaos and Fractals*, 1(1), 19-30. <https://doi.org/10.69882/adba.chf.2024073>

Cherniak I.O. RESEARCH OF DISTILBERT MODEL OPPORTUNITIES FOR FURTHER USE IN THE SYSTEM OF AUTOMATION OF ELECTRONIC DOCUMENTATION

This research article explores the potential of using the DistilBERT model to automate electronic document management (EDM) processes. EDI is an integral part of the modern business environment, as it allows to significantly reduce the time and resources spent on processing, storing and transferring documents. However, large volumes of documents and the variety of their formats create certain challenges for effective EDI automation.

DistilBERT, as one of the most advanced natural language processing (NLP) models, offers an effective solution to these problems. Developed on the basis of the BERT (Bidirectional Encoder Representations from Transformers) architecture, DistilBERT retains high text processing accuracy, but is significantly smaller and faster. This makes it an ideal tool for implementation in EDI systems where speed and efficiency are critical factors.

The article discusses the features of DistilBERT architecture and its advantages over other NLP models. In particular, the article analyzes DistilBERT's ability to understand the context and semantics of text, which is key to successful EDI automation. We also consider the possibility of fine-tuning the model for specific tasks, which allows to achieve maximum efficiency in various applications.

A series of experiments were conducted to evaluate the effectiveness of DistilBERT on EDI tasks. The model was tested on the tasks of document classification, key information extraction, and text summarization. The results of the experiments showed high accuracy and efficiency of DistilBERT in all test tasks. In particular, the model demonstrated the ability to accurately classify documents by their type and content based on the test

data, extract important information such as dates, names, addresses, etc., and create short and informative summaries of large texts.

These results confirm the prospects of using DistilBERT for EDI automation. Due to its high accuracy, speed and contextual understanding capabilities, DistilBERT can significantly improve the efficiency of document processing, reduce errors and save time and resources. This is especially true for large organizations where document volumes are significant.

The article also discusses potential areas for further research. In particular, it considers the possibility of using DistilBERT for other EDI tasks, such as automatic form filling, document compliance checking, etc. We also suggest ways to improve the model, for example, by using additional data for training or by combining DistilBERT with other NLP models.

In general, this research article makes a significant contribution to the development of EDI automation technologies. The proposed use of the DistilBERT model improves the possibilities for increasing the efficiency and productivity of document management, which can have a significant positive impact on various fields of activity.

Key words: *DistilBERT, electronic document management (EDM), natural language processing (NLP).*

Шевцов І.О.

Харківський національний університет радіоелектроніки

ГІБРИДНІ МОДЕЛІ ОБЧИСЛЕНЬ FOG І EDGE ДЛЯ ОПТИМІЗАЦІЇ ВІДДАЛЕНОГО МОНІТОРИНГУ ХРОНІЧНИХ ЗАХВОРЮВАНЬ

Стаття присвячена дослідженню гібридних моделей обчислень для оптимізації систем віддаленого моніторингу хронічних захворювань. У статті розглянуто нові вимоги до систем медичного моніторингу, що виникають через збільшення кількості пацієнтів із хронічними захворюваннями та швидкий розвиток технологій Інтернету речей (IoT). Проаналізовано обмеження традиційних хмарних обчислювальних моделей, серед яких висока затримка передачі даних і залежність від інфраструктури, що є критичними для пацієнтів, які потребують постійного спостереження та швидкого реагування на зміни стану здоров'я.

З'ясовано необхідність упровадження більш ефективних обчислювальних моделей, таких як гібридні системи Fog та Edge Computing, що дозволяють розподіл обробки даних на різних рівнях інфраструктури для зменшення затримки. Посвідчення цих моделей визнано важливим напрямом оптимізації віддаленого моніторингу пацієнтів, оскільки воно забезпечує швидшу реакцію на критичні зміни стану та гарантує безпеку й конфіденційність медичних даних.

Основними завданнями дослідження є: аналіз існуючих обчислювальних моделей (хмарних, туманних і периферійних) для віддаленого моніторингу хронічних захворювань та їх порівняння за ключовими показниками; розробка гібридної моделі на основі Fog та Edge Computing; експериментальне тестування цієї моделі в умовах, наближених до реальних, для оцінки її впливу на затримку передачі даних і надійність системи; оцінка ефективності використання обчислювальних ресурсів і зниження навантаження на інфраструктуру; а також розробка рекомендацій щодо впровадження таких моделей у медичних установах з урахуванням їхніх ресурсних можливостей.

У дослідженні застосовано методи порівняльного аналізу існуючих підходів до обробки медичних даних, які використовують хмарні, туманні та периферійні обчислення. Проведено експериментальне моделювання гібридної обчислювальної моделі в умовах, максимально наближених до реального середовища. Тестування проведено за трьома сценаріями: використання лише хмарних обчислень, застосування Edge Computing, а також комбіноване застосування Fog та Edge Computing.

Результати показали, що гібридна модель обчислень значно знижує затримку передачі даних і підвищує надійність системи порівняно з традиційними хмарними обчисленнями. Встановлено, що затримка зменшилася на 20%, а надійність передачі даних досягла 98%. Впровадження гібридної моделі також сприяло оптимізації використання обчислювальних ресурсів і зниженню навантаження на інфраструктуру.

У висновках доведено, що гібридні моделі обчислень є перспективним рішенням для покращення віддаленого моніторингу хронічних захворювань. Вони сприяють підвищенню оперативності та надійності медичних систем, знижують залежність від централізованих серверів і забезпечують високий рівень безпеки даних. Однак, для впровадження таких систем необхідні значні інвестиції та технічна підтримка, що може стати обмежувальним фактором для деяких медичних закладів.

Перспективи подальших досліджень передбачають оптимізацію гібридних моделей, дослідження їхньої ефективності в інших сферах медичної діяльності, а також розробку рекомендацій щодо їхнього впровадження у різних медичних установах з урахуванням особливостей їхньої інфраструктури та ресурсних можливостей.

Ключові слова: віддалений моніторинг, хронічні хвороби, низька затримка, Інтернет речей, гібридні моделі обчислень.

Постановка проблеми. Стрімкий розвиток технологій у сфері охорони здоров'я значно посилив потребу ефективних обчислювальних моделей, здатних підтримувати віддалений моніторинг хронічних захворювань. У контексті цифрової трансформації, інтеграція передових обчис-

лювальних платформ, таких як туманні (Fog) і периферійні (Edge) обчислення, у медичні системи відкриває значний потенціал для оптимізації обробки даних і проведення аналізу в режимі реального часу. Основна проблема полягає в обмеженнях традиційних хмарних обчислень, які часто

не можуть забезпечити необхідну швидкість передачі й обробки великих обсягів даних, що є критично важливим для своєчасного реагування й управління станом пацієнтів. Науково-технічні питання, що вирішуються в межах цієї тематики, спрямовані на розробку та впровадження гібридних моделей обчислень, які поєднують переваги туманних і периферійних обчислень для забезпечення ефективної й надійної роботи систем віддаленого моніторингу. Такий підхід дозволяє суттєво знизити затримку обробки даних, підвищити безпеку й надійність передачі інформації, а також зменшити залежність від центральних серверів, що особливо важливо в умовах дедалі більшого зростання вимог до обробки великих обсягів медичних даних. У зв'язку з цим наукові та практичні завдання, що стоять перед дослідниками, охоплюють розробку нових архітектур обчислень, оптимізацію використання ресурсів, а також забезпечення масштабованості й адаптивності систем, які працюють у реальному часі. Розв'язання цих завдань матиме вирішальне значення для подальшого розвитку віддаленого моніторингу хронічних захворювань і підвищення ефективності лікувального процесу загалом.

Аналіз останніх досліджень і публікацій.

Аналіз останніх досліджень, присвячених гібридним моделям обчислень (Fog і Edge Computing) для оптимізації віддаленого моніторингу хронічних захворювань, демонструє різноманітні підходи до підвищення продуктивності, надійності й безпеки цих систем. М. Гассан (Hassan M.) та ін. [1] і М. Камруззаман (Kamruzzaman M.) та співавт. [2] досліджують застосування гібридних обчислювальних моделей у системах віддаленого моніторингу пацієнтів з хронічними захворюваннями. Вони підкреслюють ефективність використання fog та edge computing для обробки даних у реальному часі, що зменшує затримку й підвищує якість медичних послуг. Однак ці дослідження не пропонують детальних рішень для проблеми масштабованості та стабільності систем при збільшенні кількості пацієнтів.

Дж. Авогунде (Awotunde J.) та ін. [3] і Ц. Фу (Fu C.) і співавт. [4] акцентують увагу на використанні хмарних технологій у поєднанні з fog та edge computing для підвищення продуктивності й масштабованості систем моніторингу. Вони досліджують виклики й перспективи впровадження таких гібридних моделей, але залишають відкритими питання сумісності з існуючими медичними системами та наявність технічної підтримки для забезпечення стабільної роботи.

Б. Тріпаті (Tripathy B.) та ін. [5] і Н. Нігар (Nigar N.) і співавт. [6] розглядають інтеграцію методів машинного навчання з fog та edge computing, що дає змогу підвищити точність діагностики й персоналізованого лікування. Це особливо актуально для систем, що моніторять хронічні захворювання, де точність і своєчасність обробки даних відіграють вирішальну роль. Проте питання оптимізації роботи таких систем в умовах нестабільного мережевого з'єднання потребують додаткового дослідження.

С. Чай (Chai S.) і Л. Го (Guo L.) [7] та М. Кантіпуді (Kantipudi M.) і співавт. [8] досліджують питання обробки великих обсягів даних у медичних додатках, а саме: використання алгоритмів глибокого навчання для аналізу серцевих даних. Їхні дослідження показують, що поєднання fog та edge computing з глибоким навчанням підвищує ефективність обробки медичних даних, однак питання автоматизації аналізу та адаптивності системи до змінних умов досі залишаються відкритими.

П. Донг (Dong P.) і співавт. [9] та С. Сінгх (Singh S.) і співавт. [10] підкреслюють значення архітектурних особливостей fog та edge computing, окреслюють їхню роль у зменшенні затримок і підвищенні швидкості обробки даних у системах охорони здоров'я. Вони звертають увагу на важливість правильного вибору архітектури для оптимізації продуктивності медичних додатків, але не повністю вирішують питання сумісності архітектур із хмарними технологіями.

Н. Аль Мудаві (Al Mudawi N.) [11] та М. Ларуї (Laroui M.) і співавт. [12] акцентують увагу на розподілі обчислювальних завдань між різними рівнями інфраструктури, що дає змогу зменшити затримку й підвищити стабільність роботи медичних систем. Це особливо важливо для медичних додатків IoT, де ефективно управління ресурсами є критичним, проте питання автоматизованого управління ресурсами та оптимізації їх використання в реальному часі залишаються актуальними.

А. Мутлаг (Mutlag A.) і співавт. [13] розглядають технологічні аспекти впровадження fog computing у системах охорони здоров'я, підкреслюючи його роль у підвищенні надійності й масштабованості медичних додатків, однак питання інтеграції цих систем у різні типи медичних установ потребують подальших досліджень.

Попри значну кількість досліджень, подальшого вивчення потребують питання розробки й аналізу гібридних моделей обчислень, що поєднують туманні (Fog) і периферійні (Edge) обчис-

лення, для оптимізації віддаленого моніторингу хронічних захворювань.

Мета статті полягає в розробці й аналізі гібридних моделей обчислень, що поєднують туманні (Fog) і периферійні (Edge) обчислення, для оптимізації віддаленого моніторингу хронічних захворювань.

1. Аналіз існуючих моделей обчислень (хмарних, туманних і периферійних) для систем віддаленого моніторингу хронічних захворювань та їх порівняння за основними показниками швидкості, надійності та безпеки.

2. Розробка гібридної моделі обчислень на основі Fog та Edge Computing, спрямованої на оптимізацію віддаленого моніторингу пацієнтів з хронічними захворюваннями.

3. Експериментальне тестування гібридної моделі у реальних умовах з метою оцінки її ефективності в зниженні затримок передачі даних та підвищенні надійності системи.

4. Оцінка впливу гібридної моделі на ефективність використання обчислювальних ресурсів та зниження навантаження на інфраструктуру віддаленого моніторингу.

5. Розробка рекомендацій для впровадження гібридних моделей обчислень у медичні установи для покращення моніторингу хронічних захворювань, з урахуванням специфіки інфраструктури та ресурсів.

Виклад основного матеріалу. Дослідження наявних підходів до використання туманних і периферійних обчислень у медичних системах демонструє значний потенціал для вдосконалення віддаленого моніторингу пацієнтів [14]. У традиційних моделях хмарних обчислень центральний сервер обробляє великі обсяги даних, що генеруються численними пристроями Інтернету речей (IoT). Однак ці моделі [15] мають обмеження, зокрема високу затримку під час передачі даних, що може негативно вплинути на оперативність ухвалення медичних рішень. Введення туманних і периферійних обчислень спрямоване на подолання цих обмежень шляхом розподілу обчислювальних ресурсів ближче до джерел даних, що знизить затримку й підвищить надійність системи.

Туманні обчислення (Fog Computing) передбачають використання проміжних вузлів, розташованих між кінцевими пристроями та хмарним центром обробки даних. Ці вузли здатні обробляти частину даних локально, що може зменшити навантаження на центральний сервер і прискорити реакцію системи на зміни стану пацієнта. Периферійні обчислення (Edge Computing) ще

більше зменшують затримку, оскільки дані обробляються безпосередньо на рівні кінцевих пристроїв, як-от сенсори або мобільні телефони пацієнтів, які ті носять із собою [16]. Периферійні обчислення (Edge Computing) дають змогу здійснювати первинну обробку даних на місці їхнього виникнення, що мінімізує затримку та знижує залежність від централізованої інфраструктури.

Туманні й периферійні обчислення дозволяють не лише оптимізувати процеси обробки даних, але й підвищити загальну безпеку системи, оскільки дані можна обробляти локально в межах медичного закладу або за допомогою особистого пристрою пацієнта. У таблиці 1 наведено порівняння ключових характеристик цих підходів з традиційними хмарними обчисленнями.

Хмарні, туманні та периферійні обчислення мають різні ключові характеристики, що впливають на їх використання в медичних системах. Хмарні обчислення забезпечують централізовану обробку даних з високою масштабованістю, але з високою затримкою та помірною безпекою, залежною від централізованої інфраструктури. Туманні обчислення пропонують середній рівень затримки і високий рівень безпеки, розподіляючи обробку між проміжними вузлами, що знижує залежність від центральних серверів. Периферійні обчислення характеризуються найнижчою затримкою та дуже високою безпекою завдяки обробці даних безпосередньо на кінцевих пристроях, але з обмеженою масштабованістю і мінімальною залежністю від централізованої інфраструктури.

У таблиці 2 наведено основні сценарії використання туманних і периферійних обчислень у різних медичних застосуваннях.

У медичних системах застосування хмарних, туманних та периферійних обчислень має різні підходи до обробки даних, що суттєво впливають на ефективність кожного сценарію. Хмарні обчислення, з їхньою централізованою інфраструктурою, пропонують можливість обробки великих обсягів даних, що є критично важливим для моніторингу стану пацієнтів. Однак, через віддалений характер обробки, може спостерігатися значна затримка у виявленні аномалій, що знижує оперативність реакції на критичні зміни у стані пацієнтів. Оперативне управління медичними пристроями також залежить від мережевого з'єднання, яке може вплинути на швидкість реагування. Хоча хмарні обчислення забезпечують можливість швидкого централізованого контролю, затримки у передачі даних можуть вплинути на оператив-

Порівняння ключових характеристик хмарних, туманних і периферійних обчислень у медичних системах

Параметр	Хмарні обчислення	Туманні обчислення	Периферійні обчислення
Місце обробки даних	Центральний сервер	Проміжні вузли між пристроями та хмарою	Кінцеві пристрої
Затримка	Висока	Середня	Низька
Безпека даних	Помірна	Висока	Дуже висока
Залежність від централізованої інфраструктури	Висока	Низька	Мінімальна
Масштабованість	Висока	Середня	Обмежена

Джерело: сформовано автором на підставі [3; 9; 7; 10]

Сценарії використання туманних і периферійних обчислень у медичних системах

Сценарій	Хмарні обчислення	Туманні обчислення	Периферійні обчислення
Віддалений моніторинг пацієнтів	Обробка даних на віддалених серверах з можливістю централізованого аналізу великої кількості даних, але з високою затримкою при виявленні аномалій.	Обробка даних із сенсорів у проміжних вузлах, швидке виявлення аномалій	Місцева обробка даних на сенсорах, миттєва реакція на зміни
Оперативне управління медичними пристроями	Центральний контроль через хмару дозволяє швидке реагування на зміни стану, але залежить від якості мережевого з'єднання.	Центральний контроль з високою швидкістю реагування	Локальний контроль, автономне ухвалення рішень на пристроях
Обробка великих обсягів даних	Розподілена обробка даних у хмарі з можливістю зберігання і аналізу великих обсягів інформації, але з можливими затримками у передачі даних.	Розподілена обробка з передачею найважливіших даних до хмари	Обробка лише необхідних даних, передача мінімального обсягу даних до хмари

Джерело: сформовано автором на підставі [8; 11; 17; 18]

ність ухвалення рішень. Щодо обробки великих обсягів даних, хмара дозволяє ефективно зберігати і аналізувати великі обсяги інформації, але можливі затримки у передачі даних можуть вплинути на ефективність системи.

Туманні обчислення пропонують компроміс між централізованою і локальною обробкою даних, що особливо корисно для віддаленого моніторингу пацієнтів. В обробці даних на проміжних вузлах туманних обчислень швидкість виявлення аномалій підвищується завдяки зменшенню затримок у передачі даних до центрального сервера. Оперативне управління медичними пристроями також виграє від високої швидкості реагування, яку забезпечують проміжні вузли, що обробляють дані в реальному часі. У випадку обробки великих обсягів даних, туманні обчислення дозволяють розподілити обробку між локальними і віддаленими ресурсами, що знижує навантаження на мережу та зменшує затримки у передачі критичних даних до хмари.

Периферійні обчислення зосереджені на обробці даних безпосередньо на місці, що забезпечує миттєву реакцію на зміни в стані пацієнтів. Місцева обробка даних на сенсорах або

кінцевих пристроях дозволяє негайно виявляти аномалії та реагувати на них, не чекаючи передачі даних до віддаленого сервера. Оперативне управління медичними пристроями в цьому контексті є автономним, що дозволяє пристроям приймати рішення без затримок, пов'язаних із зовнішніми системами. При обробці великих обсягів даних периферійні обчислення обробляють лише критичну інформацію на місці і передають до хмари тільки необхідні дані, що дозволяє зменшити обсяг даних і навантаження на мережу. Таким чином, кожен з підходів має свої переваги та обмеження, які визначають їх ефективність у різних медичних сценаріях. Системи віддаленого моніторингу, що використовують туманні та периферійні обчислення, повинні враховувати кілька важливих параметрів для ефективного обробки та передачі даних. До них відносяться затримка обробки, швидкість передачі даних, потужність системи та рівень безпеки. Розуміння впливу цих параметрів на загальну ефективність систем є критично важливим для покращення оперативності моніторингу й забезпечення високої якості обслуговування пацієнтів (табл. 3).

Вплив ключових параметрів на ефективність обробки й передачі даних у системах віддаленого моніторингу

Параметр системи	Характеристика впливу на ефективність обробки та передачі даних
Затримка обробки	Висока затримка збільшує час реагування системи, зменшуючи її оперативність. Туманні й периферійні обчислення допомагають зменшити затримку.
Швидкість передачі	Висока швидкість передачі даних дозволяє швидше реагувати на зміни, забезпечуючи оперативний моніторинг. Оптимізація мережевої інфраструктури сприяє підвищенню швидкості передачі.
Обробна здатність	Висока обробна здатність дає змогу ефективно обробляти великі обсяги даних без затримок. Залежить від потужності обчислювальних вузлів та алгоритмів обробки.
Рівень безпеки	Високий рівень безпеки забезпечує захист даних про пацієнтів, зменшуючи ризик їхнього перехоплення. Туманні й периферійні обчислення можуть підвищити рівень безпеки даних.

Джерело: сформовано автором на основі [5; 6; 16]

Висока затримка обробки даних, що може перевищувати 100 мс, може суттєво знизити оперативність системи. Туманні й периферійні обчислення здатні скоротити затримку до 10–50 мс завдяки обробці даних ближче до джерела. Висока швидкість передачі даних, що досягає кількох Гбіт/с, і висока обробна здатність системи забезпечують оперативну обробку даних. Високий рівень безпеки, включаючи шифрування даних і багатофакторну аутентифікацію, знижує ризики перехоплення даних про пацієнтів.

Модель HealthFog [19] базується на fog computing, що дозволяє обробляти дані з медичних сенсорів на локальних серверах або пристроях. Це знижує затримку ухвалення рішень та підвищує приватність даних пацієнтів. Завдяки цій моделі медичні дані обробляються оперативно, що значно прискорює реакцію на критичні зміни стану здоров'я пацієнтів.

Модель DeepFog [20] поєднує технології глибокого навчання з fog і edge computing, дозволяючи аналізувати великі обсяги медичних даних, такі як зображення чи сигнали життєво важливих функцій, у режимі реального часу. Це забезпечує не тільки реакцію на поточний стан пацієнта, але й прогнозування можливих ускладнень, що є цінним для діагностики та моніторингу серйозних захворювань, таких як онкологічні чи кардіологічні.

Модель REMIND [21], яка використовує мережу IoT пристроїв разом із fog та edge computing, орієнтована на забезпечення надійного й ефективного моніторингу пацієнтів з хронічними захворюваннями. Вона дозволяє безперервно відстежувати стан здоров'я пацієнтів з мінімальними затримками, що важливо для оперативного реагування на будь-які зміни. Її застосування особливо ефективно для пацієнтів із респіраторними та серцево-судинними захворюваннями.

IoT-Fog-Cloud Framework [22] – це інтеграційний підхід, що об'єднує IoT пристрої, fog

та хмарні обчислення для комплексного збору, обробки й зберігання медичних даних. Модель забезпечує обробку даних на різних рівнях, від edge-пристроїв до хмарних серверів, що надає гнучкість і масштабованість системі. Централізоване управління даними з використанням хмарних ресурсів є особливо важливим для великих медичних установ.

На практиці існуючі гібридні моделі для віддаленого моніторингу хронічних захворювань демонструють низку переваг. Вони забезпечують швидку обробку великих обсягів даних у режимі реального часу, що дозволяє оперативно реагувати на зміни стану пацієнтів [23]. Крім того, такі моделі сприяють підвищенню приватності медичних даних завдяки локальній обробці на edge- або fog-пристроях, що знижує ризик несанкціонованого доступу під час передачі інформації до хмарних серверів.

Проте ці моделі також зіштовхуються з певними недоліками. Однією з основних проблем є складність управління різнорідними обчислювальними середовищами, що вимагає координації між edge, fog і cloud рівнями. Інша проблема – це високі вимоги до апаратного забезпечення, яке має забезпечувати безперебійну роботу в різних умовах і середовищах. Крім того, важливим викликом залишається баланс між високою швидкістю обробки даних та відповідністю стандартам безпеки й приватності.

З огляду на ці виклики, необхідно розробити нову гібридну модель, яка поєднуватиме переваги наявних рішень, водночас мінімізуючи їхні недоліки. Така модель повинна забезпечувати високу швидкість і надійність обробки даних, масштабованість та гнучкість у різних умовах застосування. Вона також має відповідати суворим стандартам безпеки й приватності медичних даних, враховуючи особливості роботи з чутливою інформацією. Інтеграція адаптивних алгоритмів і технологій

глибокого навчання дозволить покращити точність прогнозів та ефективність системи в цілому.

Розробка гібридної моделі обчислень, яка інтегрує передові рішення для віддаленого моніторингу, відображає сучасні потреби у швидкій, гнучкій і надійній обробці медичних даних. Така модель базується на ієрархічній структурі, що дозволяє оптимізувати процеси обробки на кожному рівні, значно підвищуючи ефективність системи.

На найнижчому рівні – рівні периферійних обчислень – дані обробляються безпосередньо на кінцевих пристроях, таких як сенсори або медичне обладнання пацієнтів. Це дозволяє негайно реагувати на зміни стану здоров'я, мінімізуючи затримки та підвищуючи ефективність системи саме в критичних ситуаціях, коли час є вирішальним фактором.

Наступний рівень обчислень зосереджений на туманних вузлах, які розташовані між кінцевими пристроями та центральними серверами. Їх основне завдання – обробка та фільтрація даних. Завдяки цьому значно зменшується обсяг інформації, що передається до хмари, що не тільки знижує навантаження на мережу, але й прискорює загальний процес реагування. Водночас цей рівень відіграє ключову роль у забезпеченні безпеки, оскільки дозволяє здійснювати шифрування або анонімізацію даних до їх передачі на вищі рівні.

На вершині ієрархії знаходиться центральний сервер, відповідальний за довгострокове зберігання та аналіз історичних даних. Тут відбувається стратегічне планування та управління глобальними процесами, що дозволяє здійснювати глибокий аналіз і приймати обґрунтовані рішення. Розподілена архітектура моделі робить її стійкою до збоїв: оскільки більша частина обробки здійснюється на локальному рівні, ризик перевантаження центральних серверів значно знижується.

Таким чином, ця модель не тільки забезпечує швидку реакцію на критичні зміни стану пацієнтів, але й підвищує загальну ефективність та безпеку обробки медичних даних, що є ключовим у сучасних умовах.

Таблиця 4 містить порівняльний аналіз функцій і характеристик на різних рівнях гібридної моделі обчислень, застосованої в системах віддаленого моніторингу хронічних захворювань.

Модель дає змогу створити більш адаптивну й ефективну систему моніторингу, яка знижує ризики затримок і втрат даних, що особливо важливо для віддаленого моніторингу пацієнтів з хронічними захворюваннями. У системі гібридної моделі обчислень кожен рівень виконує свої специфічні функції, що забезпечує більш точну та своєчасну реакцію на зміни стану пацієнта. Архітектура гібридної моделі обчислень (Fog + Edge) у системах моніторингу хронічних захворювань наведена на рис. 1.

Зображена схема ілюструє ієрархічну структуру гібридної моделі обчислень для систем віддаленого моніторингу, яка включає три основні рівні: збір даних (Edge Computing), проміжну обробку (Fog Computing) і централізовану аналітику (Cloud Computing). Кожен рівень виконує конкретні функції обробки та передачі даних, що сприяє оптимальній роботі системи в цілому.

Перший рівень – збір даних. На цьому етапі кінцеві пристрої, такі як медичні сенсори, обробляють первинну інформацію (показники пульсу, тиску тощо) в режимі реального часу. Первинна фільтрація й шифрування даних на рівні пристроїв дозволяє забезпечити конфіденційність та миттєву обробку інформації, що підвищує оперативність реагування на зміни в стані пацієнта. На цьому рівні також відбувається локальне збереження критичних даних до їхньої передачі на вищі рівні.

Другий рівень – проміжна обробка. Туманні вузли відповідають за агрегацію даних, їх попе-

Таблиця 4

Порівняння функцій та характеристик різних рівнів гібридної моделі обчислень у системах віддаленого моніторингу хронічних захворювань

Рівень обробки	Основні функції	Переваги	Обмеження
Кінцеві пристрої (периферійні обчислення)	Первинна обробка даних, безпосереднє реагування на зміни стану пацієнта	Низька затримка, швидка реакція, автономність, висока безпека даних	Обмежені обчислювальні потужності, обмежений час роботи від батареї
Проміжні вузли (туманні обчислення)	Локальна фільтрація, попередня обробка й агрегація даних	Середня затримка, баланс між продуктивністю й безпекою, зменшення трафіку до хмари	Середня затримка, баланс між продуктивністю й безпекою, зменшення трафіку до хмари
Центральний сервер (хмарні обчислення)	Глобальне зберігання й аналіз даних, централізоване управління	Висока масштабованість, централізоване управління, доступ до великих обчислювальних ресурсів	Висока затримка, залежність від надійності мережі, потенційні ризики безпеки

Джерело: власна розробка автора

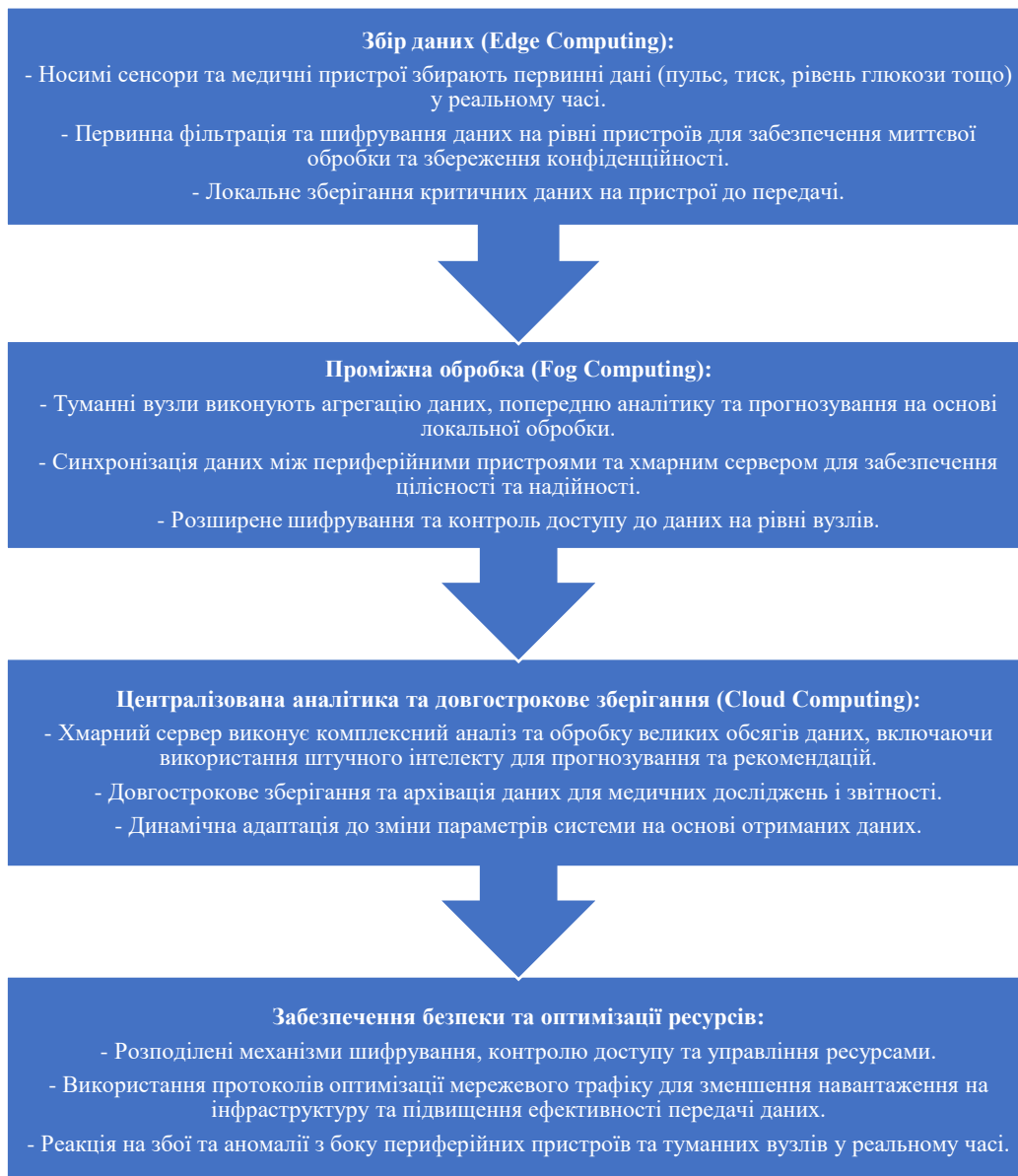


Рис. 1. Архітектура гібридної моделі обчислень (Fog + Edge) у системах медичного моніторингу

Джерело: власна розробка автора

редній аналіз та фільтрацію перед передачею до хмарного сервера. Важливою функцією цього рівня є синхронізація між периферійними пристроями та хмарною інфраструктурою, що забезпечує цілісність і надійність системи. Розширене шифрування та контроль доступу на рівні вузлів також сприяють захисту даних під час передачі.

Третій рівень – централізована аналітика. Хмарний сервер виконує комплексний аналіз великих обсягів даних із використанням штучного інтелекту для прогнозування та надання рекомендацій. Довгострокове зберігання даних і динамічна адаптація системи до зміни параметрів також є ключовими функціями цього рівня.

Це дозволяє здійснювати стратегічне управління процесами та надавати довгострокові рішення для покращення медичного обслуговування.

Завершальний етап структури – забезпечення безпеки та оптимізації ресурсів. Використання розподілених механізмів шифрування й протоколів контролю доступу гарантує надійність зберігання й обробки даних. Оптимізація трафіку дозволяє мінімізувати затримки й покращити загальну ефективність системи. Реакція на збої системи відбувається в режимі реального часу, що знижує ризик серйозних наслідків для пацієнтів.

Ця модель ієрархічна, оскільки на кожному рівні обробляється специфічний тип даних,

а функції кожного рівня підтримують наступний, забезпечуючи комплексний підхід до збору, обробки та зберігання даних.

Проте впровадження й підтримка гібридної системи вимагає значних інвестицій у технології, що може стати фактором обмеження для деяких медичних установ. Складність інтеграції різних обчислювальних підходів потребує ретельного налаштування і може ускладнити процес розробки й підтримки системи. Гібридна модель може забезпечити гнучкість і адаптивність системи, що дає змогу ефективно реагувати на різні умови експлуатації й потреби пацієнтів. Мінімізація затримок досягається завдяки обробці даних ближче до їхнього джерела, що є критично важливим для систем, які мають оперативно реагувати на життєво важливі показники пацієнтів.

Моделювання та експериментальна перевірка запропонованої гібридної моделі у контексті віддаленого моніторингу хронічних захворювань були здійснені з метою оцінки її ефективності та практичної придатності для використання в реальних умовах. Було створено тестову платформу, що імітувала умови медичного середовища, зокрема віддалений моніторинг пацієнтів із хронічними захворюваннями. Ця платформа складалася з медичних сенсорів, що постійно фіксували показники життєво важливих функцій пацієнтів, таких як серцевий ритм, кров'яний тиск та рівень кисню в крові. Сенсори були інтегровані з обчислювальними вузлами, які забезпечували початкову обробку даних на локальному рівні та передавали їх до проміжних вузлів для подальшого аналізу.

Експеримент було організовано так, щоб максимально наблизити умови до реальних, з урахуванням специфічних вимог медичного моніторингу, серед яких висока надійність передачі даних, низька затримка при обробці інформації та здатність системи працювати безперервно, навіть за умов виникнення проблем із мережею. Дані, зібрані з сенсорів, оброблялися за різними сценаріями, що включали базову модель, яка використовувала лише хмарні обчислення, модель з Edge Computing, де частина обчислень виконувалася на рівні локальних вузлів, і гібридну модель, яка об'єднувала Fog та Edge Computing.

Тестування в базовому сценарії показало, що централізована обробка даних на хмарному сервері призводить до значної затримки через високе навантаження на мережу. Цей сценарій використовувався як контрольний, щоб порівняти результати з іншими моделями. У сценарії з використан-

ням Edge Computing значна частина обчислень виконувалася на локальних вузлах, що дозволило знизити затримку передачі даних і навантаження на мережу, оскільки лише оброблені дані передавалися на центральний сервер. Гібридна модель Fog та Edge Computing продемонструвала найкращі результати, дозволяючи оптимально розподілити обчислювальні ресурси між локальними вузлами та проміжними рівнями обчислення. Такий підхід забезпечив максимальну стабільність системи, мінімальні затримки передачі даних і високу надійність навіть у випадку часткових збоїв у мережі.

Результати експерименту показали, що гібридна модель значно скорочує затримку передачі даних – до 20% у порівнянні з традиційними хмарними обчисленнями. На додаток до цього, система демонструвала високу надійність, особливо в умовах нестабільного інтернет-з'єднання. Це забезпечило безперервність обслуговування пацієнтів та можливість швидкого реагування на зміни стану здоров'я.

Таблиця 5 відображає результати експериментальних досліджень, які порівнюють традиційні хмарні обчислення з гібридною моделлю у різних сценаріях.

Попри очевидні переваги, моделювання виявило й певні обмеження гібридної моделі. Зокрема, складність управління й необхідність значних інвестицій у створення відповідної інфраструктури можуть стати суттєвими перешкодами для широкого впровадження таких систем у медичних закладах із обмеженим бюджетом. Крім того, інтеграція різних технологій в єдину систему вимагає вирішення питань сумісності й безпеки даних, що особливо важливо в умовах зростання кіберзагроз. Також варто зважати на підвищені витрати на інтеграцію й підтримку такої системи, що може виявитися критичним фактором під час масштабного впровадження в умовах обмежених ресурсів.

Розробка рекомендацій щодо впровадження й використання гібридних моделей обчислень для підвищення ефективності віддаленого моніторингу хронічних захворювань у реальних медичних умовах базується на комплексному підході до оптимізації обчислювальних ресурсів і мережевої інфраструктури. Основним завданням є забезпечення надійного, безперервного та швидкого доступу до даних пацієнтів, що дасть змогу лікарям своєчасно реагувати на зміни стану здоров'я пацієнтів (табл. 6).

Розробка покрокового алгоритму впровадження гібридної моделі обчислень має ключове

Таблиця 5

Порівняння традиційних хмарних обчислень з гібридною моделлю у різних сценаріях

Параметр/Характеристика	Хмарні обчислення	Гібридна модель (Edge + Fog Computing)
Середній час затримки, мс	200–300	50-100
Надійність передачі даних, %	85	98
Використання обчислювальних ресурсів, %	Високе	Оптимізоване
Рівень автономності локальних вузлів	Низький	Високий
Складність управління	Середня	Висока
Витрати на інфраструктуру	Середні	Високі
Безпека даних	Висока (за умов додаткових заходів)	Висока (за умов додаткових заходів)
Загальна вартість володіння (TCO)	Низька	Висока

Джерело: власна розробка автора

Таблиця 6

Рекомендації щодо впровадження гібридних моделей обчислень Fog і Edge для оптимізації віддаленого моніторингу хронічних захворювань

Рекомендація	Пояснення
Встановлення Edge пристроїв у медичних установах	Забезпечує швидку обробку даних про стан пацієнтів безпосередньо на місці, зменшуючи затримки в передачі життєво важливих показників.
Використання Fog обчислень для розподілу навантаження	Fog обчислення забезпечують оптимізацію роботи мережі, зменшуючи перевантаження центральних серверів, що критично для постійного моніторингу стану пацієнтів.
Інтеграція з актуальними хмарними платформами	Дає можливість зберігати й аналізувати історичні дані про стан пацієнтів, що необхідно для довгострокового моніторингу та прогнозування розвитку захворювань.
Навчання медичного персоналу	Медичний персонал має навчитися використовувати пристрої Edge і Fog технології для правильного збору й обробки даних про пацієнтів.
Забезпечення технічної підтримки	Необхідна постійна підтримка для уникнення технічних збоїв і забезпечення стабільності моніторингової системи в режимі реального часу.

Джерело: власна розробка автора

значення для успішного виконання роботи в галузі. Алгоритм охоплює такі етапи: оцінку поточної інфраструктури, вибір відповідних технологій, інтеграцію з актуальними системами, тестування на пілотних об'єктах, повноцінне впровадження й постійний моніторинг та оптимізацію системи.

На першому етапі аналізується наявна інфраструктура медичних установ, визначаються вимоги до обчислювальних ресурсів і пропускової здатності мережі. Далі вибираються відповідні Edge та Fog рішення, що забезпечать максимальну продуктивність системи. Наступним кроком є інтеграція нових технологій з актуальними хмарними платформами, що забезпечить безперервність надання медичних послуг. Далі відбувається тестування на пілотних об'єктах, завдяки якому виявляються можливі проблеми та вносяться потрібні коригування. Після успішного тестування система впроваджується в повному обсязі із забезпеченням технічної підтримки й навчанням персоналу. Останнім етапом є постійний моніторинг системи та її оптимізація для підвищення ефективності й надійності роботи.

Отже, впровадження гібридних моделей обчислень дає змогу значно підвищити ефективність віддаленого моніторингу хронічних захворювань, забезпечуючи стабільність і швидкість обробки даних, що є критично важливим для своєчасного надання медичної допомоги.

Висновки. У статті проведено дослідження існуючих моделей обчислень для систем віддаленого моніторингу хронічних захворювань, зокрема хмарних, туманних (Fog) та периферійних (Edge) обчислень. Було досліджено їхні ключові характеристики, такі як швидкість обробки даних, надійність, масштабованість та рівень безпеки.

Проведений порівняльний аналіз показав обмеження традиційних хмарних моделей, що включають високу затримку передачі даних та залежність від централізованих серверів. У результаті дослідження було виявлено, що нові вимоги до медичних систем потребують застосування гібридних моделей обчислень, які дозволяють розподіляти обробку даних на різних рівнях, забезпечуючи кращу оперативність та безпеку.

На основі цього аналізу було розроблено гібридну модель обчислень, яка інтегрує переваги Fog і Edge Computing для покращення роботи систем віддаленого моніторингу.

Розроблена ієрархічна структура гібридної моделі дозволяє кожному рівню системи виконувати специфічні функції, що забезпечує низьку затримку під час передачі даних, підвищену безпеку та надійність обробки медичної інформації. Зокрема, запропонована модель скорочує затримку передачі даних до 20%, а рівень надійності передачі інформації підвищується до 98%. Крім того, застосування гібридної моделі зменшує навантаження на інфраструктуру та оптимізує використання обчислювальних ресурсів.

Однією з ключових переваг моделі є зниження залежності від централізованих серверів і покращення безпеки даних завдяки локальній обробці

на рівні периферійних пристроїв. Однак впровадження таких систем вимагає значних фінансових інвестицій та постійної технічної підтримки, що може стати обмежувальним фактором для окремих медичних закладів. Дослідження також виявило складність управління різнорідними обчислювальними середовищами та необхідність інтеграції різних технологій для підтримки стабільності системи.

Отримані результати підтверджують перспективність подальшої оптимізації гібридних моделей для інших медичних застосувань та вивчення їх ефективності в різних сценаріях медичного моніторингу.

Перспективи наступних досліджень передбачають подальшу оптимізацію ресурсів, адаптацію до нових умов експлуатації й вивчення ефективності в різних медичних сценаріях.

Список літератури:

1. Hassan M., Kader S., Rahman M. A review of fog and edge computing in healthcare: Challenges and solutions. *Health Information Science and Systems*. 2021. Vol. 9. P. 1–12. DOI: <https://doi.org/10.1007/s13755-021-00412-8>.
2. Kamruzzaman M., Hossain M., Hasan M. A systematic review of edge and fog computing in health care: Opportunities and challenges. *Journal of Network and Computer Applications*. 2022. Vol. 203. P. 103363. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jnca.2022.103363>.
3. Awotunde J., Okeowo A., Ikuomola A. A survey on fog computing for healthcare services: Opportunities and challenges. *Journal of Network and Computer Applications*. 2021. Vol. 178. P. 102967. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jnca.2021.102967>.
4. Fu C., Qiu J., Gao Y. A survey on fog computing: Concepts, applications, and future directions. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*. 2019. Vol. 21. P. 1020–1038. DOI: <https://doi.org/10.1109/COMST.2019.2897948>.
5. Tripathy B., Mohanty S., Sinha S. Hybrid cloud architecture for smart healthcare systems. *IEEE Transactions on Cloud Computing*. 2020. Vol. 8. P. 1037–1050. DOI: <https://doi.org/10.1109/TCC.2020.2975593>.
6. Nigar N., Awan M., Khan M. Edge computing for smart healthcare: A review. *Future Generation Computer Systems*. 2021. Vol. 115. P. 530–546. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.future.2020.09.039>.
7. Chai S., Guo L. Deep learning in medical image analysis: A survey. *Journal of Healthcare Engineering*. 2019. Vol. 2019. P. 1–18. DOI: <https://doi.org/10.1155/2019/1047138>.
8. Kantipudi M., Rani K., Kumar P. Fog and edge computing for healthcare: Opportunities and challenges. *Health Information Science and Systems*. 2020. Vol. 8. P. 1–11. DOI: <https://doi.org/10.1007/s13755-020-00307-2>.
9. Dong P., Liu H., Zhang Z. A novel fog computing architecture for healthcare applications. *IEEE Internet of Things Journal*. 2019. Vol. 6. P. 7973–7982. DOI: <https://doi.org/10.1109/JIOT.2019.2921411>.
10. Singh S., Saini J., Kumar P. Fog computing in healthcare: A survey. *IEEE Access*. 2020. Vol. 8. P. 1150–1167. DOI: <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.2968312>.
11. Al Mudawi N., Alhammad A., Shahzad K. Edge and fog computing in healthcare: A survey on enabling technologies and challenges. *Journal of Healthcare Engineering*. 2020. Vol. 2020. P. 1–17. DOI: <https://doi.org/10.1155/2020/8046173>.
12. Laroui M., Taleb T., Serhrouchni A. Edge and fog computing for IoT: A survey on current research activities & future directions. *Computer Communications*. 2021. Vol. 180. P. 210–231. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.comcom.2021.09.003>.
13. Mutlag A., Ghani I., Arunkumar N., Mohammed M., Baker T. Enabling technologies for fog computing in healthcare IoT systems. *Future Generation Computer Systems*. 2019. Vol. 90. P. 62–78. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.future.2018.07.049>.
14. Технології інтернету речей. Навчальний посібник: навч. посіб. Для студ. спеціальності 126 «Інформаційні системи та технології», спеціалізація «Інформаційне забезпечення робототехнічних систем» / Б. Ю. Жураковський, І.О. Зенів; КПІ ім. Ігоря Сікорського. Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2021. 271 с.
15. Vital Signs Prediction and Early Warning Score Calculation Based on Continuous Monitoring of Hospitalised Patients Using Wearable Technology / A. Youssef Ali Amer et al. *Sensors*. 2020. Vol. 20, no. 22. P. 6593. URL: <https://doi.org/10.3390/s20226593> (date of access: 18.09.2024).

16. Prasad V.K., Bhavsar M.D., Tanwar S. Influence of monitoring: Fog and edge computing. *Scalable Computing: Practice and Experience*. 2019. Vol. 20, № 2. P. 365–376. DOI: <https://doi.org/10.12694/scpe.v20i2.1533>.

17. Seljakanmani S., Sumathi M. Fuzzy assisted fog and cloud computing with MIoT system for performance analysis of health surveillance system. *Journal of Ambient Intelligence and Humanized Computing*. 2021. Vol. 12, № 3. P. 3423–3436. DOI: <https://doi.org/10.1007/s12652-020-02156-y>.

18. El Kafhali S., El Mir I. Exploring the effectiveness of cloud, Internet of Things and fog computing for healthcare monitoring systems. *Computational Intelligence for Medical Internet of Things (MIoT) Applications*, 2023. Vol. 12. P. 77–91. DOI: <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-99421-7.00008-8>.

19. HealthFog: An ensemble deep learning based Smart Healthcare System for Automatic Diagnosis of Heart Diseases in integrated IoT and fog computing environments / S. Tuli et al. *Future Generation Computer Systems*. 2020. Vol. 104. P. 187–200. URL: <https://doi.org/10.1016/j.future.2019.10.043> (date of access: 18.09.2024).

20. Prevalence and associated features of self-reported freezing of gait in Parkinson disease: The DEEP FOG study / M. Amboni et al. *Parkinsonism & Related Disorders*. 2015. Vol. 21, no. 6. P. 644–649. URL: <https://doi.org/10.1016/j.parkreldis.2015.03.028> (date of access: 18.09.2024).

21. Description of the REMIND Model (Version 1.6) / G. Luderer et al. *SSRN Electronic Journal*. 2015. URL: <https://doi.org/10.2139/ssrn.2697070> (date of access: 18.09.2024).

22. An IoT-Fog-Cloud Integrated Framework for Real-Time Remote Cardiovascular Disease Diagnosis / A. Pati et al. *Informatics*. 2023. Vol. 10, no. 1. P. 21. URL: <https://doi.org/10.3390/informatics10010021> (date of access: 18.09.2024).

23. Засоби моніторингу мережі в іот інфраструктурі з гібридною архітектурою / А. Каплунов та ін. *Телекомунікаційні та інформаційні технології*. 2023. Вип. 2. С. 22–32. DOI: 10.31673/2412-4338.2022.022332

Shevtsov I.O. HYBRID COMPUTING MODELS (FOG AND EDGE) FOR OPTIMIZING REMOTE MONITORING OF CHRONIC DISEASES

The article is dedicated to the study of hybrid computing models for optimizing remote monitoring systems of chronic diseases. It examines the new requirements for medical monitoring systems, driven by the increase in the number of patients with chronic diseases and the rapid development of Internet of Things (IoT) technologies. The limitations of traditional cloud computing models are analyzed, particularly the high latency in data transmission and dependence on infrastructure, which is critical for patients requiring constant monitoring and timely response to changes in their health status.

The necessity of implementing more efficient computing models, such as hybrid Fog and Edge systems, which distribute data processing across different infrastructure levels to reduce latency, has been identified. The combination of these models is recognized as an essential direction for optimizing remote patient monitoring, as it enhances the response speed to critical health changes and ensures the security and confidentiality of medical data.

The main objectives of the study include: analyzing existing computing models (cloud, fog, and edge) for remote monitoring of chronic diseases and comparing them based on key performance indicators; developing a hybrid model based on Fog and Edge Computing; conducting experimental testing of this model in conditions close to real-life scenarios to assess its impact on data transmission latency and system reliability; evaluating the efficiency of resource utilization and reducing infrastructure load; and developing recommendations for the implementation of such models in medical institutions, considering their resource capabilities.

The research employs methods of comparative analysis of existing approaches to medical data processing using cloud, fog, and edge computing. Experimental modeling of the proposed hybrid computing model was carried out in conditions closely resembling a real environment. The testing involved three scenarios: using only cloud computing, applying Edge Computing, and the combined use of Fog and Edge Computing.

The results demonstrated that the hybrid computing model significantly reduces data transmission latency and improves system reliability compared to traditional cloud computing. It was found that latency decreased by 20%, and data transmission reliability increased to 98%. The implementation of the hybrid model also helped optimize resource utilization and reduce infrastructure load.

The conclusions show that hybrid computing models are a promising solution for improving the remote monitoring of chronic diseases. They enhance the responsiveness and reliability of medical systems, reduce dependence on centralized servers, and ensure a high level of data security. However, implementing such systems requires significant investments and technical support, which may be a limiting factor for some medical institutions.

The prospects for further research include optimizing hybrid models, exploring their effectiveness in other areas of medical practice, and developing recommendations for their implementation in various medical institutions, taking into account the specific features of their infrastructure and resource capabilities.

Key words: remote monitoring, chronic diseases, low latency, Internet of Things, hybrid computing models.

ХІМІЧНІ ТЕХНОЛОГІЇ

УДК 622.5:628.477.7

DOI <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2024.5.1/49>

Іванченко А.В.

Дніпровський державний технічний університет

Воронов В.В.

Дніпровський державний технічний університет

АДСОРБЦІЙНЕ ВИЛУЧЕННЯ ФОСФАТІВ ТА ПОВЕРХНЕВО-АКТИВНИХ РЕЧОВИН З РІДКИХ ВІДХОДІВ ХІМІЧНО МОДИФІКОВАНИМ ЦЕОЛІТОМ

Стаття присвячена розв'язанню важливої науково-технічної задачі встановлення особливостей процесу вилучення неорганічних фосфатів та поверхнево-активних речовин (ПАР) хімічно модифікованим цеолітом в області високих концентрацій. На основі аналізу науково-технічної літератури з'ясовано, що у зв'язку з інтенсивним зростанням і розвитком господарської діяльності, за останні роки значно збільшилось надходження в навколишнє середовище з рідкими відходами та стічними водами фосфатів та поверхнево-активних речовин. Наголошено, що дані політанти попадають у стоки з мийними засобами і чинять негативний вплив на довкілля, викликають евтрофікацію водойм, яка характеризується надмірним ростом водоростей. Охарактеризовано сучасні сорбенти для очищення стічних вод фосфатів та поверхнево-активних речовин. Зазначено, що у світовій практиці для вилучення техногенних політантів, використовують природні та неорганічні сорбенти, глинисті матеріали, цеоліти, а також модифіковані матеріали на основі рослинної лігноцелюлозної сировини. Наведено відомі способи модифікування цеоліту розчинами мінеральних кислот та йонами Аргентуму для підвищення антибактеріальних властивостей. У даній роботі запропоновано модифікування цеоліту Сокирницького родовища Закарпатської області 10-% розчином кальцінованої соди. Встановлено особливості вилучення неорганічних фосфатів та поверхнево-активних речовин хімічно модифікованим цеолітом при підвищеному їх вмісті, а саме аніонів PO_4^{3-} – 100 г/дм³, ПАР – 450 мг/дм³. Отримано значення концентрації фосфатів та поверхнево-активних речовин та кожній стадії адсорбції. Виявлено, що максимальний ступінь очищення рідких відходів від поверхнево-активних речовин складає 93,33 %, фосфатів – 97,25 % при витраті сорбенту 3 г/дм³ за протиточно-ступінчастою схемою в каскаді з трьох лабораторних адсорберів. Експериментально доведено вміст фосфатів до рівня гранично допустимої концентрації України – 0,035 г/дм³. Зроблено хімічний аналіз відпрацьованого цеолітового сорбенту після вилучення аніонів PO_4^{3-} та поверхнево-активних речовин, який містить 9,4 % фосфору та 3,11 % калію у перерахунку на оксиди. Запропоновано утилізувати відпрацьований цеоліт як добавку до добрив пролонгованої дії. Створено технологічну схему очищення фосфоровмісних стічних вод з одержанням добрив.

Ключові слова: хімічно модифікований цеоліт, фосфати, поверхнево-активні речовини, кальцінована сода, адсорбер, добрива.

Постановка проблеми. Неорганічні фосфати та поверхнево-активні речовини (ПАР) широко застосовуються у господарській діяльності та побуті як мийні засоби, антикорозійні речовини, емульгатори і суспензатори пестицидів, у виробництві мінеральних добрив і кормових добавок, компонентів лікарських препаратів і косметики. Населення планети кожного дня контактує з фосфатами та ПАР, кількість яких у навколишньому середовищі зростає з кожним роком.

Потрапляючи у водойми, фосфати та ПАР перешкоджають процесам біологічного окиснення і запобігають їхньому самоочищенню. В результаті погіршуються санітарно-хімічні показники якості води: збільшується сухий залишок, зростає споживання кисню, що призводить до евтрофікації водойм, яка характеризується надмірним ростом водоростей, особливо синьо-зелених (здебільшого ціанобактерій) [1]. Деякі автори вказують, що концентрація ПАР та фосфору у водосховищі на рівні

0,02 мг/дм³ є достатньою для стимуляції росту водоростей [2–4]. Евтрофікація може призвести до різкого зменшення розчиненого кисню за відсутності сонячного світла і, як наслідок, до депопуляції водних видів, створення "мертвих зон" [5]. Уникнення цього явища є вкрай важливим, оскільки відомо, що відновлення водойми, яка зазнала евтрофікації, є дуже повільним процесом [6].

Тому пошук ефективних методів вилучення фосфатів та ПАР з рідких відходів є перспективним науковим напрямком, що потребує постановки експериментальних досліджень.

У світовій практиці використання сорбентів визнано перспективним для низки природоохоронних заходів та вилучення техногенних поллютантів [7–9]. Мінеральні та природні сорбенти можна використовувати для очищення або доочищення стічних вод різних промислових підприємств та міських стоків.

Аналіз останніх досліджень та публікацій.

Глинисті матеріали широко вивчаються як адсорбенти для багатьох забруднювачів, у тому числі і фосфатів та ПАР, завдяки таким фізико-хімічним властивостям, як реакційна здатність і велика питома поверхня. Глини мають різну структуру, вони несуть сумарний негативний заряд, що робить їх ефективними адсорбентами для катіонів металів, органічних речовин [10–12]. Повідомляється, що поглинання фосфатів глинистими матеріалами відбувається відносно швидко, причому адсорбційна рівновага досягається за 1–2 год для модифікованих палигорськіту і монтморилоніту [11, 12].

Широке поширення в останні роки набуло використання модифікованих сорбентів на основі лушпиння соняшника, пшениці, стебел кукурудзи. В цілях підвищення сорбційних властивостей ці матеріали модифікувалися обробкою розчинами формальдегіду, натрій гідроксиду та мінеральних кислот. Механізм сорбції поллютантів даними сорбентами можна пояснити таким чином: основний склад пшеничного лушпиння становлять клітковина і целюлоза. Целюлоза – довголанцюговий полісахарид, що складається з глікозидних залишків, пов'язаних між собою ефірними містками (1,4 β-глюкозидними містками). Елементарні ланки целюлози –C₆H₁₀O₅– з'єднуються в довгі лінійні макромолекули за допомогою глюкозидного зв'язку або кисневого містка –O–. Характерною особливістю целюлози є наявність у кожній елементарній ланці трьох гідроксильних груп –OH–. Функціональна гідроксильна група здатна взаємодіяти з поллютантами, утримуючи їх у порах та на поверхні

сорбенту. Отже, механізм очищення даними природними сорбентами відбувається не тільки за рахунок фізичної сорбції, а й хемосорбції. Макромолекули полімеру взаємодіють між собою за допомогою Ван-дер-ваальсових сил та водневих зв'язків, обумовлених наявністю гідроксильних груп. Після термічної обробки відбувається окислення та карбонізація полімеру, що підвищує фізичну адсорбцію поллютантів.

Цеоліти – це алюмосилікатні мінерали, які зазвичай використовуються як адсорбенти. Нещодавні дослідження показали, що цеоліти мають обмежену здатність поглинати фосфати з розбавлених синтетичних розчинів [13]. Однак вони діють на видалення фосфатів та ПАР з високомісних реальних стічних вод шляхом адсорбції на цеолітах за допомогою іонного обміну, викликаючи вивільнення іонів кальцію, які осаджуються разом з фосфатами [14, 15].

Адсорбційна ємність модифікованих форм цеоліту в 1,5–5 разів вища, ніж у природних і синтетичних без обробки. Оптимальний рН для поглинання становить 5–6 [16, 17].

Досліджено кінетику вилучення катіонів Na⁺, Ca²⁺, K⁺ та Al³⁺ природним цеолітом, хімічно модифікованого 5 %-ою сульфатною кислотою [18].

Проаналізовано області використання природного цеоліту – клиноптилоліту – як сорбенту для очищення природних і стічних вод. Зазначено перспективність модифікування цеоліту йонами Аргентуму, які надають йому антибактеріальних властивостей. Подано опис лабораторної установки та методики проведення досліджень з модифікування цеоліту. Наведено результати дегідратування природного клиноптилоліту за температур 100–400°С під дією електромагнітних випромінювань надвисокочастотного діапазону [19].

У даній роботі досліджено можливість очищення рідких відходів від фосфатів поверхнево-активних речовин хімічно модифікованим цеолітом 10-% розчином кальцинованої соди.

Постановка завдання. Мета дослідження – встановити особливості процесу вилучення неорганічних фосфатів та ПАР хімічно модифікованим цеолітом в області високих концентрацій.

Виклад основного матеріалу. Як адсорбент для очищення промислових стічних вод, забруднених неорганічними фосфатами та ПАР, використовували цеоліт Сокирницького родовища Закарпатської області витратою 3 г/дм³, попередньо активованій 10-% розчином кальцинованої соди. Рідкі відходи

вихідною концентрацією неорганічних фосфатів 100 мг/дм³ та ПАР 450 мг/дм³ очищали за протиточно-ступінчастою схемою адсорбції хімічно модифікованим цеолітом в каскаді з трьох лабораторних адсорберів. Результати експериментальних досліджень наведено на рисунках 1 та 2.

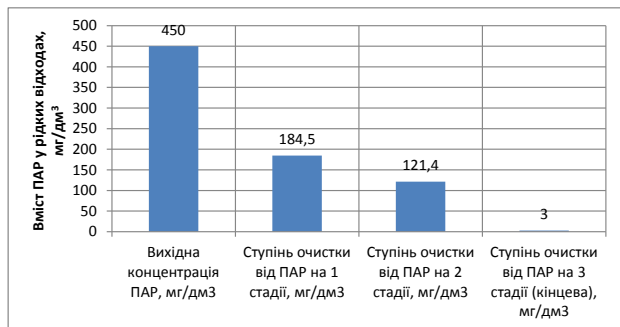


Рис. 1. Результати вилучення ПАР з рідких відходів хімічно модифікованим цеолітом

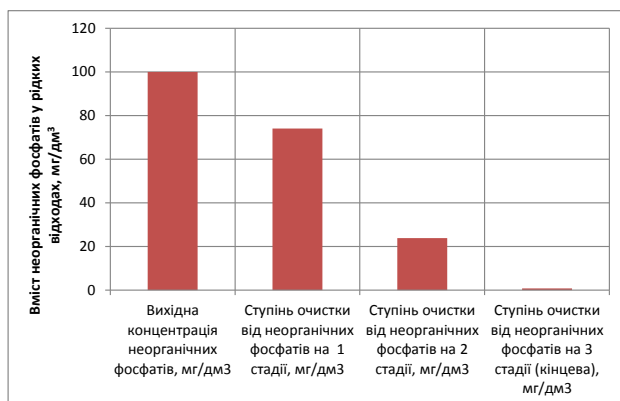


Рис. 2. Результати вилучення неорганічних фосфатів з рідких відходів хімічно модифікованим цеолітом

В результатів експериментальних досліджень встановлено, що максимальний ступінь очищення рідких відходів від ПАР складає 93,33 %. Ефективність вилучення фосфатів із використанням хімічно модифікованого цеоліту в області високих концентрацій ≈ 100 мг/дм³, становить 97,25 % і досягає рівня гранично допустимої концентрації по Україні, що складає 0,035 мг/дм³, а низька собівартість сорбенту дозволяє широко застосовувати цеоліт в системах очищення стічних вод на підприємствах хімічної промисловості, а також у комунальному господарстві.

На наступному етапі експериментальних досліджень визначено хімічний склад мінеральної частини відпрацьованого цеоліту після вилучення фосфатів із використанням спектрометра рентгенівського випромінювання «ElvaX», (похибка не перевищує 0,1%). Якісний склад

мінеральної частини відпрацьованого сорбенту показано у таблиці 1. Вміст мінеральної частини відпрацьованого сорбенту становив 98,97 %, органічної – 1,03 %.

Таблиця 1

Якісний склад мінеральної частини відпрацьованого сорбенту

№ п/п	Елемент	Вміст, %
1	SiO ₂	69,27
	P ₂ O ₅	9,40
2	Al ₂ O ₃	12,33
3	K ₂ O	3,11
4	CaO	2,31
5	Na ₂ O	2,18
6	Fe ₂ O ₃	1,40

З таблиці 1 видно, що відпрацьований сорбент після вилучення аніонів PO₄³⁻ та ПАР містить фосфор (9,4 %) та калій (3,11 %), що дає підстави рекомендувати його як добавку до добрив пролонгованої дії. Тобто запропонований метод адсорбції забезпечить ефективне вилучення фосфоровмісних полютантів з одночасним отриманням цінних компонентів для виробництва мінеральних та органо-мінеральних добрив.

Розроблено технологічну схему очищення фосфоровмісних стічних вод з одержанням добрив в умовах міських очисних споруд, що представлена на рисунку 3. Схема працює наступним чином. Після завершення процесу механічного очищення стічна вода направляється в аеротенк 1, в якому відбувається біологічне окислення забруднюючих речовин мікроорганізмами активного мулу. Аеротенки повинні забезпечувати необхідний ефект окислювання і мінералізації органічних речовин, що містяться в стічних водах. Робота аеротенків заснована на використанні процесу біологічного окислювання органічних речовин стічних вод. Суміш активного мулу в стічних водах, які очищуються, повільно протікає уздовж коридорів аеротенків.

Для забезпечення життєдіяльності мікроорганізмів-мінералізаторів в аеротенк повинен безупинно надходити кисень. Вміст розчиненого кисню має бути не менше 4 мг/дм³. Після аеротенків мулова суміш направляється по трубопроводу для відстоювання у вторинні радіальні відстійники 3. Вторинні відстійники повинні забезпечувати необхідну ступінь видалення води з пластівців активного мулу (до 10–20 мг/дм³).

По залізобетонному трубопроводу суміш мулу поступає в розподільну чашу, обладнану водозливами з широкими порогами, які забезпечують роз-

Список літератури:

1. Huisman J., Hulot F. D. Population dynamics of harmful cyanobacteria. Harmful Cyanobacteria (Huisman J, Matthijs HCP & Visser PM, eds). 2005. 700 p.
2. Yao Y. et al. Engineered carbon (biochar) prepared by direct pyrolysis of Mg-accumulated tomato tissues: characterization and phosphate removal potential. *Bioresource technology*. 2013. V. 138. P. 8–13.
3. Kilpimaa S. et al. Physical activation of carbon residue from biomass gasification: Novel sorbent for the removal of phosphates and nitrates from aqueous solution. *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*. 2015. V. 21. P. 1354–1364.
4. Li R. et al. Recovery of phosphate from aqueous solution by magnesium oxide decorated magnetic biochar and its potential as phosphate-based fertilizer substitute. *Bioresource technology*. 2016. V. 215. P. 209–214.
5. Diaz R. J., Rosenberg R. Spreading dead zones and consequences for marine ecosystems. *Science*. 2008. V. 321. №. 5891. P. 926–929.
6. Yeoman S. et al. The removal of phosphorus during wastewater treatment: a review. *Environmental Pollution*. 1988. V. 49. №. 3. P. 183–233.
7. Іванченко А.В., Сорока О.В., Єлатонцев Д.О., Ткаченко Е.Е., Чупринов Є.В., Яцен Т.Г., Рєвак О.А. Дослідження технології вилучення цинку та феруму із водних середовищ сорбентами на основі природної сировини. *Вчені записки ТНУ імені В.І. Вернадського. (технічні науки)*. Т. 32 (71) № 6, 2021. С. 167–171.
8. Ivanchenko A.V., Soroka O.V., Sokol O.D. Removal ions of ferrum(III) and zinc from aqueous environments by chemically activated sorbents from natural raw materials. *Journal of Chemistry and Technologies. Oles Honchar Dnipro National University*. 31 (2). 2023. P. 344–352.
9. Іванченко А.В., Сорока О.В., Воронов В.В. Вилучення важких металів із водних середовищ лігноцелюлозним сорбентом із використанням адсорбера з псевдозрідженим шаром. *Вчені записки ТНУ імені В.І. Вернадського (технічні науки)*. Т. 35 (74) № 1. 2024. С. 91–95.
10. Perassi I., Borgnino L. Adsorption and surface precipitation of phosphate onto CaCO₃-montmorillonite: effect of pH, ionic strength and competition with humic acid. *Geoderma*. 2014. V. 232. P. 600–608.
11. Bouraie M., Masoud A. A. Adsorption of phosphate ions from aqueous solution by modified bentonite with magnesium hydroxide Mg (OH)₂. *Applied Clay Science*. 2017. V. 140. P. 157–164.
12. Mahadevan H. et al. Optimization of retention of phosphate species onto a novel bentonite–alum adsorbent system. *Environmental Technology & Innovation*. 2018. V. 9. P. 1–15.
13. Mitrogiannis D. et al. Removal of phosphate from aqueous solutions by adsorption onto Ca(OH)₂ treated natural clinoptilolite. *Chemical Engineering Journal*. 2017. V. 320. P. 510–522.
14. Wan C. et al. Simultaneous recovery of nitrogen and phosphorus from sludge fermentation liquid by zeolite adsorption: Mechanism and application. *Separation and Purification Technology*. 2017. V. 180. P. 1–12.
15. Mitrogiannis D. et al. Phosphate recovery from real fresh urine by Ca(OH)₂ treated natural zeolite. *Chemical Engineering Journal*. 2018. V. 347. P. 618–630.
16. Goscianska J. et al. Removal of phosphate from water by lanthanum–modified zeolites obtained from fly ash. *Journal of colloid and interface science*. 2018. V. 513. P. 72–81.
17. Pham T. H. et al. La–modified ZSM–5 zeolite beads for enhancement in removal and recovery of phosphate. *Microporous and Mesoporous Materials*. 2019. V. 279. P. 37–44.
18. Ягольник С.Г., Троцький В.І., Ханик Я.М. Кінетика хімічного модифікування цеолітів сульфатною кислотою. *Науковий вісник Національний лісотехнічного університету України*, 2006. вип. № 16. С. 118–122.
19. Знак З.О., Грабаровська А.С., Зінь О.І., Дяденчук А.В. Модифікування термічно активованого природного кліноптилоліту йонами аргентуму *Вісник Черкаського державного технологічного університету*. 2019. № 4. С. 79–86.

Ivanchenko A.V., Voronov V.V. ADSORPTIVE REMOVAL OF PHOSPHATES AND SURFACTANTS FROM LIQUID WASTE BY CHEMICALLY MODIFIED ZEOLITE

The article is devoted to the solution of an important scientific and technical task of establishing the features of the extraction process of inorganic phosphates and surface-active substances (surfactants) by chemically modified zeolite in the area of high concentrations. Based on the analysis of the scientific and technical literature, it was found that in connection with the intensive growth and development of economic activity, the flow of phosphates and surface-active substances into the environment with liquid waste and wastewater has significantly increased in recent years. It is emphasized that these pollutants get into sewage with detergents and have a negative impact on the environment, cause eutrophication of water bodies, which is characterized by excessive growth of algae. Modern sorbents for the purification of waste water of phosphates

and surface-active substances are characterized. It is noted that in world practice, natural and inorganic sorbents, clay materials, zeolites, as well as modified materials based on plant lignocellulosic raw materials are used to remove man-made pollutants. Known methods of modifying zeolite with solutions of mineral acids and Argentinum ions to increase antibacterial properties are given. In this paper, modification of zeolite from the Sokyrnytsky deposit of Zakarpattia region with a 10% solution of soda ash is proposed. The peculiarities of extraction of inorganic phosphates and surface-active substances by chemically modified zeolite with their increased content, namely PO_4^{3-} anions – 100 g/dm^3 , surfactants – 450 mg/dm^3 , were established. The value of the concentration of phosphates and surface-active substances at each stage of adsorption was obtained. It was found that the maximum degree of purification of liquid waste from surface-active substances is 93,33%, phosphates – 97,25% at a sorbent consumption of 3 g/dm^3 according to a counter-current-step scheme in a cascade of three laboratory adsorbers. The content of phosphates was experimentally brought to the level of the maximum permissible concentration of Ukraine – $0,035 \text{ g/dm}^3$. A chemical analysis of the spent zeolite sorbent after extraction of PO_4^{3-} anions and surface-active substances was made, which contains 9,4 % phosphorus and 3,11% potassium in terms of oxides. It is proposed to dispose of spent zeolite as an additive to long-acting fertilizers. A technological scheme for the purification of phosphorus-containing wastewater with the production of fertilizers has been created.

Key words: chemically modified zeolite, phosphates, surfactants, soda ash, adsorber, fertilizers.

Відомості про авторів

Бернацький А.В. – кандидат технічних наук, старший дослідник, завідувач відділу «Спеціалізована високовольтна техніка та лазерне зварювання» Інституту електрозварювання імені Є.О. Патона Національної академії наук України

Білевська О.С. – старший науковий співробітник Українського науково-дослідного інституту спеціальної техніки та судових експертиз Служби безпеки України

Богдан Г.А. – кандидат технічних наук, доцент кафедри автоматизації та систем неруйнівного контролю Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Бойчук Т.В. – аспірант кафедри комп'ютерних систем і мереж Івано-Франківського національного технічного університету нафти і газу

Брестовицький Р.М. – аспірант кафедри електронних обчислювальних машин Харківського національного університету радіоелектроніки

Бугрій А.М. – кандидат технічних наук, старший викладач кафедри електронних обчислювальних машин Харківського національного університету радіоелектроніки

Вакалюк Т.А. – доктор педагогічних наук, професор, завідувач кафедри інженерії програмного забезпечення Державного університету «Житомирська політехніка»

Василенко В.М. – кандидат технічних наук, доцент, завідувач кафедри комп'ютерних технологій дизайну і графіки факультету наземних споруд і аеродромів Національного авіаційного університету

Васильєв С.В. – магістр кафедри інформаційних технологій Державного університету інфраструктури та технологій

Волк М.О. – доктор технічних наук, професор, професор кафедри електронних обчислювальних машин Харківського національного університету радіоелектроніки

Волошин В.С. – кандидат економічних наук, доцент, доцент кафедри комп'ютерних технологій та економічної кібернетики Національного університету водного господарства та природокористування

Волощук В.А. – доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри «Автоматизація енергетичних процесів» Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Воронов В.В. – аспірант кафедри хімічних та біологічних технологій Дніпровського державного технічного університету

Гарист А.В. – начальник відділу Українського науково-дослідного інституту спеціальної техніки та судових експертиз Служби безпеки України

Геращенко О.О. – аспірант кафедри автоматизації енергетичних процесів Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Глущенко М.О. – аспірант кафедри автоматизації та систем неруйнівного контролю Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Головко І.Г. – аспірант Хмельницького національного університету

Гуйда О.Г. – кандидат наук з державного управління, доцент, завідувач кафедри комп'ютерних та інформаційних технологій Таврійського національного університету імені В.І. Вернадського

Гетьман О.В. – викладач кафедри телекомунікацій Київського політехнічного інституту імені Ігоря Сікорського

Денисюк Д.О. – старший викладач кафедри комп'ютерної інженерії та інформаційних систем Хмельницького національного університету

Дереза А.Ю. – кандидат технічних наук, доцент кафедри інформаційних технологій та комп'ютерної інженерії Національного технічного університету «Дніпровська політехніка»

Дмитренко О.А. – аспірант кафедри інформаційних технологій в телекомунікаціях Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Донських О.В. – аспірантка кафедри автоматизації та інформаційних систем Кременчуцького національного університету імені Михайла Остроградського

Живков О.П. – кандидат технічних наук, доцент кафедри телекомунікацій Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Жук С.Я. – доктор технічних наук, професор кафедри радіотехнічних систем Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Завгородній В.В. – доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри інформаційних технологій Державного університету інфраструктури та технологій

Завгородня Г.А. – кандидат технічних наук, доцент кафедри інформаційних технологій Державного університету інфраструктури та технологій

Загреба А.Я. – студент 2 курсу магістратури кафедри конструювання електронно обчислювальної апаратури Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Зозуля В.А. – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри цифрової економіки та системного аналізу Державного торговельно-економічного університету

Іванишин В.В. – аспірант кафедри автоматизації та комп'ютерних технологій систем управління імені професора А.П. Ладанюка факультету автоматизації і комп'ютерних систем Національного університету харчових технологій

Іванченко А.В. – доктор технічних наук, доцент, професор кафедри хімічних та біологічних технологій Дніпровського державного технічного університету

Іванченко О.В. – доктор технічних наук, доцент, професор кафедри програмного забезпечення комп'ютерних систем Національного технічного університету «Дніпровська політехніка»

Карпенко М.І. – аспірант кафедри автоматизації та комп'ютерних технологій систем управління імені професора А.П. Ладанюка Національного університету харчових технологій

Катін П.Ю. – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри радіотехнічних систем Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Каштальян А.С. – кандидат технічних наук, доцент, докторанка, доцент кафедри фізики та електротехніки Хмельницького національного університету

Ковтун Є.І. – аспірант кафедри електронних обчислювальних машин Харківського національного університету радіоелектроніки

Когдась М.Г. – доцент кафедри автоматизації та інформаційних систем Кременчуцького національного університету імені Михайла Остроградського

Короленко Я.Р. – магістрант кафедри комп'ютерно-інтегрованих оптичних та навігаційних систем Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Кот Н.С. – вчитель математики та фізики Комунального закладу загальної середньої освіти «Ліцей 5» Хмельницької міської ради

Лебедев Д.Ю. – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри конструювання електронно обчислювальної апаратури Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Легеа А.В. – викладач кафедри програмного забезпечення ДВНЗ «Ужгородський національний університет»

Лисенко О.І. – доктор технічних наук, професор кафедри телекомунікацій Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Лисюк Г.П. – аспірант кафедри програмних та комп'ютерно-інтегрованих технологій Національного університету «Одеська політехніка»

Лобач Я.В. – магістрант кафедри електронних обчислювальних машин Харківського національного університету радіоелектроніки

Лисенко О.І. – доктор технічних наук, професор кафедри телекомунікацій Київського політехнічного інституту імені Ігоря Сікорського

Мадінов М.Л. – аспірант кафедри мобільних та відеоінформаційних технологій Державного університету інформаційно-комунікаційних технологій

Макогонов А.В. – аспірант кафедри автоматизації, комп'ютерних наук і технологій Криворізького національного університету

Маринич І.А. – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри автоматизації, комп'ютерних наук і технологій Криворізького національного університету

Маруняк С.Т. – аспірант кафедри телекомунікацій Національного університету «Львівська політехніка»

Медзатий Д.М. – доцент Хмельницького національного університету

- Медзятий Д.М.** – кандидат технічних наук, доцент Хмельницького національного університету
- Мельниченко Д.В.** – магістр 1 року навчання Державного університету «Житомирська політехніка»
- Мішин О.В.** – магістр, аспірант кафедри радіотехнічних систем Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»
- Мовчан К.О.** – старший науковий співробітник Українського науково-дослідного інституту спеціальної техніки та судових експертиз Служби безпеки України
- Мошенский А.О.** – кандидат технічних наук, доцент кафедри комп'ютерних та інформаційних технологій Навчально-наукового інституту муніципального управління та міського господарства Таврійського національного університету імені В.І. Вернадського
- Мошенський А.О.** – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри інформаційних технологій штучного інтелекту і кіберзахисту Національного університету харчових технологій
- Мустафаєв О.В.** – начальник відділу Українського науково-дослідного інституту спеціальної техніки та судових експертиз Служби безпеки України
- Назаров Д.Л.** – аспірант Харківського національного економічного університету імені Семена Кузнеця
- Назарова С.О.** – кандидат економічних наук, доцент Харківського національного економічного університету імені Семена Кузнеця
- Нечипоренко В.А.** – аспірант кафедри автоматизації та комп'ютерно-інтегрованих технологій Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»
- Нечипуренко А.Г.** – аспірант кафедри льотної експлуатації та безпеки польотів Льотної академії Національного авіаційного університету
- Николайчук М.Я.** – кандидат технічних наук, доцент кафедри інформаційно-телекомунікаційних технологій та систем Івано-Франківського національного технічного університету нафти і газу
- Новак Д.С.** – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри прикладної екології, технології полімерів і хімічних волокон Київського національного університету технологій та дизайну
- Новіков П.В.** – кандидат технічних наук, доцент кафедри автоматизації енергетичних процесів Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»
- Олещенко Л.М.** – кандидат технічних наук, доцент кафедри програмного забезпечення комп'ютерних систем Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»
- Омецинська Н.В.** – кандидат технічних наук, доцент, завідувачка кафедри загальноінженерних дисциплін та теплоенергетики Таврійського національного університету імені В.І. Вернадського
- Опанасюк М.Ю.** – студент кафедри комп'ютерних технологій та економічної кібернетики Національного університету водного господарства та природокористування
- Осадчий С.І.** – доктор технічних наук, професор, професор кафедри конструкції повітряних суден, авіадвигунів та підтримання льотної придатності Льотної академії Національного авіаційного університету
- Павловська Ю.О.** – аспірантка кафедри комп'ютерно-інтегрованих оптичних та навігаційних систем Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»
- Палагін В.А.** – професор кафедри автоматизації та інформаційних систем Кременчуцького національного університету імені Михайла Остроградського
- Пальоний А.С.** – кандидат технічних наук, доцент кафедри аеронавігації, метеорології та організації повітряного руху Льотної академії Національного авіаційного університету
- Панаскін Д.В.** – аспірант кафедри обчислювальної техніки Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»
- Пацьора А.А.** – аспірант кафедри комп'ютерних систем, мереж та кібербезпеки Національного університету біоресурсів і природокористування України
- Повхан І.Ф.** – доктор технічних наук, професор, професор кафедри програмного забезпечення систем ДВНЗ «Ужгородський національний університет»
- Прокопченко С.В.** – головний науковий співробітник Українського науково-дослідного інституту спеціальної техніки та судових експертиз Служби безпеки України
- Прокоф'єв І.Г.** – аспірант Хмельницького національного університету
- Прусов В.О.** – магістр кафедри інформаційних технологій Державного університету інфраструктури та технологій

Пономаренко С.О. – кандидат технічних наук, доцент, виконуючий обов’язки завідувача кафедри систем керування літальними апаратами начальсько-наукового інституту аерокосмічних технологій Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Подобед В.В. – аспірант кафедри машин і агрегатів поліграфічного виробництва Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Савенко Б.О. – доктор фізико-математичних наук, старший викладач кафедри комп’ютерної інженерії та інформаційних систем Хмельницького національного університету

Савенко О.С. – професор Хмельницького національного університету

Савенко О.С. – доктор технічних наук, професор Хмельницького національного університету

Самофалов А.В. – аспірант кафедри системного програмування і спеціалізованих комп’ютерних систем Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Сароз В.Я. – аспірант кафедри програмного забезпечення ДВНЗ «Ужгородський національний університет»

Сельоткін В.О. – аспірант кафедри «Автоматизація енергетичних процесів» Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Ситнік В.Ю. – аспірант кафедри автоматизації та інформаційних систем Кременчуцького національного університету імені Михайла Остроградського

Сіора І.В. – кандидат хімічних наук, науковий співробітник відділу «Біомедичні проблеми поверхні» Інституту хімії поверхні імені О.О. Чуйка Національної академії наук України

Сіора О.В. – науковий співробітник відділу «Спеціалізована високовольтна техніка та лазерне зварювання» Інституту електрозварювання імені Є.О. Патона Національної академії наук України

Скулиш М.А. – доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри інформаційних технологій в телекомунікаціях Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Слабінога М.О. – кандидат технічних наук, доцент кафедри комп’ютерних систем і мереж Івано-Франківського національного технічного університету нафти і газу

Соколов К.А. – аспірант радіотехнічного факультету кафедри радіотехнічних систем Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Соколовський М.В. – провідний інженер відділу «Спеціалізована високовольтна техніка та лазерне зварювання» Інституту електрозварювання імені Є.О. Патона Національної академії наук України

Соробей Б.В. – аспірант кафедри електронних обчислювальних машин Харківського національного університету радіоелектроніки

Стратонов В.М. – кандидат технічних наук, доцент кафедри пошуку, рятування та авіаційної безпеки Льотної академії Національного авіаційного університету

Стратонов В.М. – кандидат технічних наук, доцент кафедри пошуку, рятування та авіаційної безпеки Льотної академії Національного авіаційного університету

Стьопкін А.В. – кандидат фізико-математичних наук, доцент, доцент кафедри математики та інформатики ДВНЗ «Донбаський державний педагогічний університет»

Сушин І.О. – аспірант 4 курсу групи ТЗ-11ф кафедри телекомунікацій Навчально-наукового інституту телекомунікаційних систем Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Тарасенко М.М. – аспірант кафедри інформаційно-телекомунікаційних технологій та систем Івано-Франківського національного технічного університету нафти і газу

Терейковський І.А. – доктор технічних наук, професор, професор кафедри системного програмування і спеціалізованих комп’ютерних систем Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Турчин О.Б. – аспірант кафедри комп’ютерних систем і мереж Івано-Франківського національного технічного університету нафти і газу

Тачинина О.М. – доктор технічних наук, доцент кафедри аерокосмічних систем керування факультету аеронавігації, електроніки та телекомунікацій Національного авіаційного університету

Фаррахов О.В. – кандидат технічних наук, в.о. вченого секретаря Центру інформаційно-аналітичного та технічного забезпечення моніторингу об’єктів атомної енергетики Національної академії наук України

Фокін А.І. – аспірант кафедри комп’ютерних наук Західноукраїнського національного університету
Фуртат О.В. – старший викладач кафедри автоматизованого управління технологічними процесами Таврійського національного університету імені В.І. Вернадського

Черняк І.О. – аспірант кафедри інженерії програмного забезпечення Державного університету «Житомирська політехніка»

Чумаченко С.М. – доктор технічних наук, старший науковий співробітник, державний експерт служби з питань екологічної та енергетичної безпеки Апарату РНБО України

Шевцов І.О. – аспірант кафедри електронних обчислювальних машин факультету комп’ютерної інженерії та управління Харківського національного університету радіоелектроніки

Шевцов К.О. – аспірант кафедри телекомунікацій Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Юрченко Д.С. – магістрантка кафедри пошуку, рятування та авіаційної безпеки Льотної академії Національного авіаційного університету

Юрченко Д.С. – магістрантка кафедри пошуку, рятування та авіаційної безпеки Льотної академії Національного авіаційного університету

Юрченко Ю.В. – провідний інженер відділу «Спеціалізована високовольтна техніка та лазерне зварювання» Інституту електрозварювання імені Є.О. Патона Національної академії наук України

НОТАТКИ

Науковий журнал

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

Серія: Технічні науки

Том 35 (74) № 5 2024

Частина 1

Коректура • *Н. Славогородська*

Комп'ютерна верстка • *Н. Кузнєцова*

Адреса редакції:

Таврійський національний університет імені В.І. Вернадського

м. Київ, вул. Джона Маккейна, 33

Електронна пошта: editor@tech.vernadskyjournals.in.ua

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

Формат 60×84/8. Гарнітура Times New Roman.

Папір офсетний. Цифровий друк. Обл.-вид. арк. 35,41. Ум. друк. арк. 43,48. Зам. № 1124/776.

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.