

**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 34 (73) № 5 2023



Видавничий дім
«Гельветика»
2023

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 геоінженерії Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»;

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 № 3 від 02.11.2023 року)**

Науковий журнал «Вчені записки ТНУ імені В.І. Вернадського. Серія: Технічні науки» зареєстровано Міністерством юстиції України (Свідоцтво про державну реєстрацію друкованого ЗМІ серія КВ № 22895-12795Р від 11.08.2017 року)

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

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

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

ISSN 2663-5941 (Print)

ISSN 2663-595X (Online)

© Таврійський національний університет ім. В.І. Вернадського, 2023

ЗМІСТ

МАШИНОЗНАВСТВО

Gahramanov S.A.

APPLICATION OF INFORMATION TECHNOLOGIES IN CARRYING OUT SPATIAL IDENTIFICATION OF MOTOR VEHICLES.....1

ГАЛУЗЕВЕ МАШИНОБУДУВАННЯ

Petryk V.O., Trubachev S.I., Kolodezhnyi V.A.

DETERMINATION OF STRESS-STRAIN STATE OF SHELLS TAKEN INTO ACCOUNT OF STRINGERS AND FRAMES.....6

АВІАЦІЙНА ТА РАКЕТНО-КОСМІЧНА ТЕХНІКА

Бойко С.М., Котов О.Б., Іщенко С.О., Гладкий Ю.М., Шарипенко Ю.В., Гвоздік С.Д.

ОСОБЛИВОСТІ РОЗВИТКУ ЕКСПЛУАТАЦІЇ ПОВІТРЯНИХ СУДЕН МАЛОЇ АВІАЦІЇ В КОНТЕКСТІ РЕГІОНАЛЬНИХ ПЕРЕВЕЗЕНЬ.....10

Довбиш І.О., Муравйов О.В., Галаган Р.М., Богдан Г.А., Момот А.С.

СИЛОВІ УСТАНОВКИ ТА ДЖЕРЕЛА ЕНЕРГІЇ СУЧАСНИХ БПЛА.....16

ПРИЛАДИ

Романюк В.А., Стародубцев С.О.

ДОСЛІДЖЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ЛАЗЕРНИХ МЕТОДІВ ВИЯВЛЕННЯ БЕЗПІЛОТНИХ ЛІТАЛЬНИХ АПАРАТІВ 22

РАДІОТЕХНІКА ТА ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЇ

Адаменко І.О., Лисенко О.М.

МЕТОДИ ВИЗНАЧЕННЯ ПАРАМЕТРІВ ОБ'ЄКТІВ В БАГАТОКАНАЛЬНИХ СИСТЕМАХ ДЕТЕКТУВАННЯ ТА КЛАСИФІКАЦІЇ..... 27

Губар В.Г., Лисенко О.М.

ПОРІВНЯЛЬНИЙ АНАЛІЗ СТРУКТУРНО-ФУНКЦІОНАЛЬНОЇ ОРГАНІЗАЦІЇ БАГАТОКАНАЛЬНИХ СИСТЕМ ДЕТЕКТУВАННЯ І КЛАСИФІКАЦІЇ ОБ'ЄКТІВ ДЛЯ МОБІЛЬНИХ ПЛАТФОРМ ТА ОБҐРУНТУВАННЯ ВИБОРУ АРХІТЕКТУРИ РОЗРОБЛЮВАНОГО РІШЕННЯ.....33

Кононова І.В., Дубина В.О.

КОМПЛЕКСНЕ ВИКОРИСТАННЯ НАДЛИШКОВОСТІ ДЛЯ ПІДВИЩЕННЯ НАДІЙНОСТІ КОМУНІКАЦІЙНОГО ОБЛАДНАННЯ..... 40

Могилевич Д.І., Хміль Р.В.

АНАЛІЗ МЕТОДІВ РОЗПІЗНАВАННЯ ОБРАЗІВ НА ОСНОВІ НЕЙРОННИХ МЕРЕЖ..... 46

Осадчук О.В., Ліхашорський С.В.

ДОСЛІДЖЕННЯ ДИНАМІЧНОЇ НЕСТАБІЛЬНОСТІ В АКТИВНИХ НВЧ ФІЛЬТРІВ І МЕТОДИ ЇЇ ЗМЕНШЕННЯ.....53

Романов О.І., Бурлака Г.Ю.

УПРАВЛІННЯ МЕРЕЖЕЮ SDN З ВИКОРИСТАННЯМ КОНТРОЛЕРА Ryu.....59

Сбоєв Р.Ю., Могилевич Д.І.

АНАЛІЗ ФАКТОРІВ, ЩО ВПЛИВАЮТЬ НА ФУНКЦІОНАЛЬНУ СТІЙКІСТЬ ОБЛАДНАННЯ ЕЛЕКТРОННИХ КОМУНІКАЦІЙНИХ СИСТЕМ.....70

Соколов К.А.

ВІЗУАЛЬНЕ ВИЯВЛЕННЯ ТА ВІДСТЕЖЕННЯ МАЛОГАБАРИТНИХ РУХОМИХ ОБ'ЄКТІВ НА ОСНОВІ ФУНКЦІОНАЛЬНИХ ОСОБЛИВОСТЕЙ ЗОРОВОГО АПАРАТУ ТА ОСОБЛИВОСТЯХ СПРИЙНЯТТЯ ЛЮДИНИ.....75

Хапченко О.В., Лисенко О.М. ПОРІВНЯЛЬНИЙ АНАЛІЗ СУЧАСНИХ ТИФЛОТЕХНІЧНИХ РІШЕНЬ НА БАЗІ СМАРТФОНУ	83
Шмігель Б.О., Григоренко О.Г. АНАЛІЗ ХАРАКТЕРИСТИК ШИРОКОСМУГОВИХ СИГНАЛІВ В УМОВАХ ОБМЕЖЕНОЇ ЕНЕРГЕТИКИ	89

ІНФОРМАТИКА, ОБЧИСЛЮВАЛЬНА ТЕХНІКА ТА АВТОМАТИЗАЦІЯ

Беляков Р.О., Фесенко О.Д. УДОСКОНАЛЕНА МОДЕЛЬ ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОГО УПРАВЛІННЯ ВУЗЛОВИМИ РЕСУРСАМИ КОМУНІКАЦІЙНОЇ МЕРЕЖІ КЛАСУ MANET	93
Бурау Н.І., Осовцев А.В. АНАЛІЗ ЕФЕКТИВНОСТІ СИСТЕМИ СТАБІЛІЗАЦІЇ ОБЛАДНАННЯ МОБІЛЬНОГО МІНІ-РОБОТА НА МІСЦЕВОСТІ ЗІ СКЛАДНИМ ПРОФІЛЕМ	99
Вакалюк Т.А., Янчук В.М., Морозов Д.С., Зубрицький В.В., Новіцька І.В. ПРОГНОЗНЕ МОДЕЛЮВАННЯ АНАЛІТИКИ УСПІШНОСТІ СТУДЕНТІВ З ВИКОРИСТАННЯМ АЛГОРИТМІВ МАШИННОГО НАВЧАННЯ	108
Вдовичин Т.Я., Пазюк Р.І. ВИКОРИСТАННЯ ХМАРНИХ ТЕХНОЛОГІЙ ЯК ІНСТРУМЕНТУ ДЛЯ ОЦІНЮВАННЯ НАВЧАЛЬНИХ ДОСЯГНЕНЬ	117
Глухова Н.В. КОМП'ЮТЕРНО-ІНТЕГРОВАНА ТЕХНОЛОГІЯ ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСІВ ЕМІСІЇ НОСІЇВ ЗАРЯДУ З ПОВЕРХНІ РІДИННОФАЗНОГО ОБ'ЄКТУ	122
Завгородній В.В., Завгородня Г.А., Сіденков Г.Г. РОЗРОБКА ПРОГРАМНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ДЛЯ ВІЗУАЛІЗАЦІЇ ГІРСЬКИХ ПОРІД НА ОСНОВІ МЕТОДУ ФЛЕТЧЕРА-РІВСА	128
Корнієнко Б.Я., Нестерук А.О. СИСТЕМА УПРАВЛІННЯ ВИРОБНИЦТВОМ ГРАНУЛЬОВАНИХ МІНЕРАЛЬНИХ ДОБРІВ У ПСЕВДОЗРІДЖЕНОМУ ШАРІ	133
Коростельов А.С., Гученко М.І., Перекрест А.Л., Самойлов А.М., Вадурін К.О. АНАЛІТИЧНІ РОЗРАХУНКИ КОРПОРАТИВНОЇ МЕРЕЖІ БАЗОВАНОЇ НА ТЕХНОЛОГІЯХ ІНТЕРНЕТУ РЕЧЕЙ ПІДПРИЄМСТВА З ЕКОЛОГІЧНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ	140
Levkin D.A., Zhernovnyukova O.A., Synyavina Yu.V., Levkin A.V. VARIABILITY OF THE CHOICE OF THE MATHEMATICAL MODELS IN APPLIED SECURITY PROBLEMS	149
Лихошерстов Д.О., Лебедев Д.Ю. ПОРІВНЯЛЬНИЙ АНАЛІЗ ЦИФРОВИХ ЗАСОБІВ СУРДОПЕРЕКЛАДУ	154
Лісовець С.М. ВИКОРИСТАННЯ ЦИФРОВОГО ПІД-РЕГУЛЯТОРА В КОНТУРІ КЕРУВАННЯ ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНИМ ПРИВОДОМ ПРОМИСЛОВОГО РОБОТА	161
Ляшенко О.М., Кирийчук Д.Л., Дзюба А.В., Фролова М.Е., Прачик В.В. ПРОЕКТУВАННЯ, МОДЕЛЮВАННЯ ТА РОЗРОБЛЕННЯ ПРОГРАМНОГО КОМПЛЕКСУ З ОБЛІКУ КОМП'ЮТЕРНОГО ОБЛАДНАННЯ	166
Maidan M.V. IOT DEVICES PROCESSORS SYNTHESIS IN EDGE COMPUTING: APPROACH ANALISES	175
Олещенко Л.М. ОСОБЛИВОСТІ ПРОГРАМНОЇ РЕАЛІЗАЦІЇ ТЕХНОЛОГІЇ SPARK ТА МОВИ ПРОГРАМУВАННЯ R ДЛЯ РОЗПОДІЛЕНИХ ОБЧИСЛЕНЬ ВЕЛИКИХ ДАНИХ	185
Omechenko V.V., Rolik O.I. INTEGRATION OF PROACTIVE AND REACTIVE APPROACHES TO SCALING IN KUBERNETES	193
Павленко В.П., Дроздюк В.А. МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ЖИВЛЕННЯ БЕЗПІЛОТНИХ ЛІТАЛЬНИХ ПРИСТРОЇВ ДАЛЬНЬОГО РАДІУСА ДІЇ	199

Потрашкова Л.В., Літвінова О.А. ОБҐРУНТУВАННЯ ПРОЄКТНИХ РІШЕНЬ З ВІЗУАЛІЗАЦІЇ ПЕРСОНАЖІВ УКРАЇНСЬКОЇ МІФОЛОГІЇ ЗАСОБАМИ ДОПОВНЕНОЇ РЕАЛЬНОСТІ.....	204
Пулеко І.В., Побережна М.О., Кравченко С.М., Дмитренко І.А. РІШЕННЯ ЗАДАЧІ КЛАСИФІКАЦІЇ МЕДИЧНИХ ДАНИХ НА ОСНОВІ ПОЄДНАННЯ СЛУЖБИ МАШИННОГО НАВЧАННЯ AZURE ТА РОЗРОБЛЕНОГО ВЕБ-ДОДАТКУ.....	210
Редько І.В., Яганов П.О., Зилевіч М.О. КОНЦЕПТОЛОГІЧНІ ЗАСАДИ ТЕХНОЛОГІЧНИХ СИСТЕМ ПРОГРАМУВАННЯ.....	219
Сікора О.В., Кобильник Т.П. JAVA ЯК ЗАСІБ НАВЧАННЯ УЧНІВ ОСНОВ ПРОГРАМУВАННЯ.....	224
Скілков Н.В. АНАЛІЗ ЧАСОВИХ ХАРАКТЕРИСТИК ЗАДАЧ У КОМП'ЮТЕРНИХ СИСТЕМАХ РЕАЛЬНОГО ЧАСУ... 231	
Соломчак О.В., Николайчук М.Я., Соломчак А.О. АНАЛІЗ СТРАТЕГІЙ КЕРУВАННЯ СТАТКОМ В МЕРЕЖАХ З ВІТРОВИМИ ТА СОНЯЧНИМИ ЕЛЕКТРОСТАНЦІЯМИ.....	236
Стаценко Д.В., Стаценко В.В., Злотенко Б.М., Демішонкова С.А. ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОГРАМ НА ОСНОВІ ШТУЧНОГО ІНТЕЛЕКТУ В ЯКОСТІ КОМП'ЮТЕРНИХ ЗАСОБІВ ЗАХИСТУ ІНФОРМАЦІЇ.....	244
Fomin O.O., Krykun V.A., Orlov A.A., Tataryn O.V., Litynskiy V.V. MATHEMATICAL MODELS OF SOFTWARE QUALITY ASSURANCE FOR INTERPRETATION OF DYNAMIC NEURAL NETWORKS.....	250
Хазанович Ю.Ю., Киричук Ю.В., Черепанська І.Ю. СУЧАСНИЙ СТАН ПРОБЛЕМИ СИНТЕЗУ КРОКУЮЧИХ МОБІЛЬНИХ РОБОТІВ	257
Хорошевська І.О., Алексєєва І.Д. СТВОРЕННЯ МЕТОДИКИ РОЗРОБЛЕННЯ ДИЗАЙНУ МОБІЛЬНОГО ДОДАТКУ ДЛЯ СТАБІЛІЗАЦІЇ ЕМОЦІЙНОГО СТАНУ.....	266
Чумаченко С.М., Попель В.А. СИСТЕМНИЙ ПІДХІД ДО АВТОМАТИЗАЦІЇ ПРОЦЕСІВ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ КОМПЕТЕНТНОСТІ ПЕРСОНАЛУ НА ОБ'ЄКТАХ КРИТИЧНОЇ ІНФРАСТРУКТУРИ СИЛ ОБОРОНИ УКРАЇНИ.....	273
Яровий О.В., Завгородній В.В., Мухін О.В. РОЗРОБКА ІНФОРМАЦІЙНОЇ ТЕХНОЛОГІЇ УПРАВЛІННЯ МОБІЛЬНИМИ АГЕНТАМИ НА ОСНОВІ МЕРЕЖОЦЕНТРИЧНОГО ПІДХОДУ.....	284
ЕНЕРГЕТИКА	
Абдулін М.З., Куник А.А. ШЛЯХИ СТВОРЕННЯ УНІВЕРСАЛЬНИХ ТА КОМБІНОВАНИХ ПАЛЬНИКОВИХ ПРИЛАДІВ.....	289
Боянівський В.П., Трокоз Я.Є. ДОСЛІДЖЕННЯ ЗАКОНОМІРНОСТЕЙ ТЕПЛООБМІНУ ПРИ ЛАМІНАРНІЙ ПЛІВКОВІЙ КОНДЕНСАЦІЇ ВОДЯНОЇ ПАРИ ВСЕРЕДИНІ ГОРИЗОНТАЛЬНО-ТРУБНИХ ТЕПЛООБМІННИКАХ.....	295
Дульський А.І., Сторожук М.С. АЛЬТЕРНАТИВНІ ПАЛИВА В ЕНЕРГЕТИЦІ, ПРОБЛЕМИ ТА ПЕРСПЕКТИВИ.....	300
Сірий О.А., Кобилянська О.О. ШЛЯХИ ПОКРАЩЕННЯ СТАЛОСТІ ГОРІННЯ В СТАБІЛІЗАТОРНИХ ЕЛЕМЕНТАХ ПРЯМОТОЧНИХ ПАЛЬНИКОВИХ СИСТЕМ	310
МЕТАЛУРГІЯ	
Тесленко О.І., Куц Г.О. ТЕХНІКО-ЕКОНОМІЧНА ОЦІНКА ТЕХНОЛОГІЙ ЗАМІЩЕННЯ КОКСУ В ДОМЕННОМУ ВИРОБНИЦТВІ.....	316

ХІМІЧНІ ТЕХНОЛОГІЇ

- Андріянова М.В., Головенко В.О., Руднєва Л.Л., Сухий К.М.**
РОЗРОБКА ТЕХНОЛОГІЇ ЕКСТРАГУВАННЯ ОЛІЇ КАШТАНУ КІНСЬКОГО
З ПОДАЛЬШИМ ВИКОРИСТАННЯМ
ЇЇ В РЕЦЕПТУРІ КРЕМУ ДЛЯ РУК.....322
- Воробйова В.І., Хрокало Л.А., Віннічук Е.В., Кравченко Ф.Е.,
Федулова В.С., Васильєв Г.С., Скиба М.І.**
СИНТЕЗ НАНОЧАСТИНОК ЗОЛОТА З ВИКОРИСТАННЯМ ЕКСТРАКТУ ПРОДУКТІВ
ПЕРЕРОБКИ ВИНОГРАДУ НА ОСНОВІ НИЗЬКОТЕМПЕРАТУРНОГО ЕВТЕКТИЧНОГО
РОЗЧИННИКА, ЇХ АНТИБАКТЕРІАЛЬНІ ВЛАСТИВОСТІ ТА ТОКСИЧНІСТЬ.....328
- Drobyazko A.A., Linyucheva O.V., Byk M.V.**
OBTAINING AND STUDY AN OPTICAL PROPERTIES OF BLACK COATINGS
ON ALUMINUM ALLOYS.....334
- Майзеліс А.О.**
КОРОЗІЙНІ ВЛАСТИВОСТІ МУЛЬТИШАРОВИХ ПОКРИТТІВ [(CU-ZN)_{БАЗ}/(CU-ZN)_{ДОД}]_Н.....340
- Черкашина Г.М., Лебедєв В.В., Копилов С.О., Близнюк О.В., Кривобок Р.В.**
СУЧАСНІ КОМПОЗИЦІЙНІ МАТЕРІАЛИ ДЛЯ ВИГОТОВЛЕННЯ
ЗАСОБІВ ІНДИВІДУАЛЬНОГО БРОНЕЗАХИСТУ.....345

ТЕХНОЛОГІЯ ХАРЧОВОЇ ТА ЛЕГКОЇ ПРОМИСЛОВОСТІ

- Святненко Р.С., Маринін А.І., Шевченко О.Ю., Позняк О.М., Літвинчук С.І.**
МІКРОБІОЛОГІЧНІ ТА ФІЗИКО-ХІМІЧНІ ВЛАСТИВОСТІ ГРЕЧАНОГО ТА АКАЦІЄВОГО МЕДУ ..350

ТРАНСПОРТ

- Войцеховський В.С., Борець І.В., Валько А.М., Габрієлова Т.Ю.**
КОМПЛЕКСНА СИСТЕМА ОЦІНЮВАННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ УПРАВЛІННЯ
ВАНТАЖОПОТОКАМИ АВІАКОМПАНІЙ.....355
- Кириллова О.В., Кириллова В.Ю.**
АКТУАЛІЗАЦІЯ ПРОБЛЕМИ ПРОФЕСІЙНОЇ ПІДГОТОВКИ КАДРІВ ДЛЯ ТРАНСПОРТНОЇ
ГАЛУЗІ УКРАЇНИ ЧЕРЕЗ ПРИЗМУ НОВОГО ПЕРЕЛІКУ ГАЛУЗЕЙ ЗНАТЬ І СПЕЦІАЛЬНОСТЕЙ,
ЗА ЯКИМИ ЗДІЙСНЮЄТЬСЯ ПІДГОТОВКА ЗДОБУВАЧІВ ВИЩОЇ ОСВІТИ.....361
- Кунда Н.Т.**
ОПТИМІЗАЦІЯ ПАЛИВНОЇ СКЛАДОВОЇ ВИТРАТ НА МІЖНАРОДНІ
АВТОМОБІЛЬНІ ПЕРЕВЕЗЕННЯ.....370
- Фомін О.В., Баранов І.О., Мірошникова М.В.**
ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ БЕЗПЕЧНОЇ ЕКСПЛУАТАЦІЇ РУХОМОГО СКЛАДУ ЗАЛІЗНИЦЬ
НА ОСНОВІ ОЦІНКИ РЕСУРСУ ЙОГО БАЗОВИХ ЧАСТИН.....378
- Шibaєв О.Г., Коскіна Ю.О., Кравченко О.А., Акімов К.С.**
ВАНТАЖОПОТОКИ ВУГІЛЛЯ В УКРАЇНСЬКИХ ПОРТАХ: РЕТРОСПЕКТИВНИЙ ОГЛЯД
ТА СУЧАСНИЙ СТАН.....386
- Шкурко Є.Л., Безклубна Н.Л.**
ЕКОЛОГІЧНА СТІЙКІСТЬ ПОРТОВОЇ ІНФРАСТРУКТУРИ: ВПРОВАДЖЕННЯ
ЗЕЛЕНИХ ТЕХНОЛОГІЙ ТА ЕНЕРГОЕФЕКТИВНИХ РІШЕНЬ.....391
- ВІДОМОСТІ ПРО АВТОРІВ.....400**

CONTENTS

MACHINE SCIENCE

Gahramanov S.A.

APPLICATION OF INFORMATION TECHNOLOGIES IN CARRYING OUT SPATIAL IDENTIFICATION OF MOTOR VEHICLES.....1

INDUSTRIAL ENGINEERING

Petryk V.O., Trubachev S.I., Kolodezhnyi V.A.

DETERMINATION OF STRESS-STRAIN STATE OF SHELLS TAKEN INTO ACCOUNT OF STRINGERS AND FRAMES.....6

AIRCRAFT AND AEROSPACE TECHNIQUES

Boiko S.M., Kotov O.B., Ishchenko S.O., Gladky Yu.M., Sharypenko Yu.V., Gvozdik S.D.

FEATURES OF THE DEVELOPMENT OF SMALL AVIATION OPERATION WITHIN THE FRAMEWORK OF REGIONAL TRANSPORTATION.....10

Dovbysh I.O., Muraviov O.V., Galagan R.M., Bohdan H.A., Momot A.S.

POWER SYSTEMS AND ENERGY SOURCES OF MODERN UAVS.....16

EQUIPMENT

Romanyuk V.A., Starodubtsev S.O.

STUDY OF THE EFFICIENCY OF LASER METHODS FOR THE DETECTION OF UNMANNED AIRCRAFT DEVICES.....22

RADIO ENGINEERING AND TELECOMMUNICATIONS

Adamenko I.O., Lysenko O.M.

METHODS OF DETERMINING OBJECT PARAMETERS IN MULTI-CHANNEL DETECTION AND CLASSIFICATION SYSTEMS.....27

Gubar V.G., Lysenko O.M.

COMPARATIVE ANALYSIS OF THE STRUCTURAL AND FUNCTIONAL ORGANIZATION OF MULTI-CHANNEL OBJECT DETECTION AND CLASSIFICATION SYSTEMS FOR MOBILE PLATFORMS AND JUSTIFICATION OF THE CHOICE OF THE ARCHITECTURE OF THE DEVELOPED SOLUTION.....33

Kononova I.V., Dubyna V.O.

INTEGRATED USE OF REDUNDANCY TO IMPROVE THE RELIABILITY OF COMMUNICATIONS EQUIPMENT.....40

Mogylevych D.I., Khmil R.V.

ANALYSIS OF PATTERN RECOGNITION METHODS BASED ON NEURAL NETWORKS.....46

Osadchuk A.V., Likhashorskyi S.V.

DYNAMIC STABILITY ANALYSIS AND STABILIZATION METHODS FOR ACTIVE MICROWAVE FILTERS.....53

Romanov O.I., Burlaka H.Yu.

SDN NETWORK MANAGEMENT USING RYU CONTROLLER.....59

Sboiev R.Yu., Mogylevych D.I.

ANALYSIS OF FACTORS AFFECTING THE FUNCTIONAL STABILITY OF ELECTRONIC COMMUNICATION SYSTEM EQUIPMENT.....70

Sokolov K.A.

VISUAL DETECTION AND TRACKING OF SMALL MOVING OBJECTS BASED ON THE FUNCTIONAL FEATURES OF THE VISUAL APPARATUS AND THE PECULIARITIES OF HUMAN PERCEPTION.....75

Khapchenko O.V., Lysenko O.M.

COMPARATIVE ANALYSIS OF SMARTPHONE-BASED TIFLOTECHNICAL NAVIGATION SOLUTIONS.....83

Shmigel B.O., Grygorenko O.G. ANALYSIS OF THE CHARACTERISTICS OF BROADBAND SIGNALS IN CONDITIONS OF LIMITED ENERGY.....	89
--	----

INFORMATICS, COMPUTER ENGINEERING AND AUTOMATION

Bieliakov R.O., Fesenko O.D. IMPROVED MODEL OF INTELLIGENT MANAGEMENT OF NODE RESOURCES OF THE TERRESTRIAL COMMUNICATION NETWORK OF THE MANET CLASS.....	93
Bouraou N.I., Osovtsev A.V. ANALYSIS OF THE EFFICIENCY OF THE EQUIPMENT STABILIZATION OF A MOBILE MINI-ROBOT ON GROUND WITH A COMPLEX PROFILE.....	99
Vakaliuk T.A., Yanchuk V.M., Morozov D.S., Zubrytskii V.V., Novitska I.V. PREDICTIVE MODELING OF STUDENT PERFORMANCE ANALYTICS USING MACHINE LEARNING ALGORITHMS.....	108
Vdovychyn T.Ya., Pazyuk R.I. USING CLOUD TECHNOLOGIES AS A TOOL FOR EVALUATING EDUCATIONAL ACHIEVEMENTS.....	117
Glukhova N.V. COMPUTER-INTEGRATED TECHNOLOGY OF RESEARCH OF CHARGE CARRIER EMISSION PROCESSES FROM THE SURFACE OF A LIQUID-PHASE OBJECT.....	122
Zavgorodnii V.V., Zavgorodnya A.A., Sidenkov H.G. DEVELOPMENT OF SOFTWARE FOR VISUALIZATION OF ROCKS BASED ON THE FLETCHER-REEVES METHOD	128
Korniyenko B.Ya., Nesteruk A.O. CONTROL SYSTEM FOR THE PRODUCTION OF GRANULAR MINERAL FERTILIZERS IN A FLUIDIZED BED.....	133
Korostelov A.S., Guchenko M.I., Perekrest A.L., Samoilo A.M., Vadurin K.O. ANALYTICAL CALCULATIONS OF THE CORPORATE NETWORK BASED ON THE INTERNET OF THINGS TECHNOLOGIES OF THE ENVIRONMENTAL RESEARCH ENTERPRISE.....	140
Levkin D.A., Zhernovnykova O.A., Synyavina Yu.V., Levkin A.V. VARIABILITY OF THE CHOICE OF THE MATHEMATICAL MODELS IN APPLIED SECURITY PROBLEMS.....	149
Lykshosherstov D.O., Lebedev D.Yu. COMPARATIVE ANALYSIS OF DIGITAL SIGN LANGUAGE INTERPRETATION TOOLS.....	154
Lisovets S.M. USE OF DIGITAL PID REGULATOR IN CONTROL CIRCUIT OF ELECTROMECHANICAL DRIVE OF INDUSTRIAL ROBOT.....	161
Liashenko O.M., Kyryichuk D.L., Dziuba A.V., Frolova M.E., Prachyk V.V. DESIGN, MODELING AND DEVELOPMENT OF A COMPUTER EQUIPMENT ACCOUNTING SOFTWARE	166
Maidan M.V. IOT DEVICES PROCESSORS SYNTHESIS IN EDGE COMPUTING: APPROACH ANALISES.....	175
Oleshchenko L.M. SOFTWARE IMPLEMENTATION FEATURES OF SPARK TECHNOLOGY AND R PROGRAMMING LANGUAGE FOR BIG DATA DISTRIBUTED COMPUTING.....	185
Omechenko V.V., Rolik O.I. INTEGRATION OF PROACTIVE AND REACTIVE APPROACHES TO SCALING IN KUBERNETES.....	193
Pavlenko V.P., Drozdyuk V.A. MATHEMATICAL MODELING OF LONG-ENDURANCE UNMANNED AERIAL VEHICLES POWER SUPPLY.....	199
Potrashkova L.V., Litvinova O.A. JUSTIFICATION OF DESIGN DECISIONS ON VISUALIZATION OF CHARACTERS OF UKRAINIAN MYTHOLOGY USING AUGMENTED REALITY.....	204

Puleko I.V., Poberezhna M.O., Kravchenko S.M., Dmytrenko I.A.	
SOLUTION OF THE CLASSIFICATION PROBLEM FOR MEDICAL DATA ON THE BASIS OF AZURE MACHINE LEARNING SERVICE AND THE DEVELOPED WEB APPLICATION.....	210
Redko I.V., Yahanov P.O., Zylevich M.O.	
CONCEPTUAL FOUNDATIONS OF TECHNOLOGICAL PROGRAMMING SYSTEMS.....	219
Sikora O.V., Kobylnyk T.P.	
JAVA AS A TOOL FOR TEACHING STUDENTS FUNDAMENTALS OF PROGRAMMING.....	224
Skilkov N.V.	
ANALYSIS OF TIME CHARACTERISTICS OF TASKS IN REAL-TIME COMPUTER SYSTEMS....	231
Solomchak O.V., Nykolaychuk M.Ya., Solomchak A.O.	
ANALYSIS OF CONTROL STRATEGIES OF STATCOM IN POWER GRID WITH WIND AND SOLAR POWER PLANTS	236
Statsenko D.V., Statsenko V.V., Zlotenko B.M., Demishonkova S.A.	
RESEARCH OF PROGRAMS BASED ON ARTIFICIAL INTELLIGENCE AS COMPUTER TOOLS FOR INFORMATION PROTECTION.....	244
Fomin O.O., Krykun V.A., Orlov A.A., Tatoryn O.V., Litynskyi V.V.	
MATHEMATICAL MODELS OF SOFTWARE QUALITY ASSURANCE FOR INTERPRETATION OF DYNAMIC NEURAL NETWORKS.....	250
Khazanovych Yu.Yu., Kyrychuk Yu.V., Cherepanska I.Yu.	
CURRENT STATE OF THE PROBLEM OF THE SYNTHESIS OF WALKING MOBILE ROBOTS.....	257
Khoroshevska I.O., Alieksieieva I.D.	
CREATING A METHODOLOGY FOR DEVELOPING A MOBILE APPLICATION DESIGN FOR EMOTIONAL STABILIZATION.....	266
Chumachenko S.M., Popel V.A.	
A SYSTEMATIC APPROACH TO THE AUTOMATION OF PROCESSES FOR ENSURING PERSONNEL COMPETENCE AT CRITICAL INFRASTRUCTURE FACILITIES OF THE DEFENSE FORCES OF UKRAINE.....	273
Yarovyi O.V., Zavgorodnii V.V., Mukhin O.V.	
DEVELOPMENT OF INFORMATION TECHNOLOGY FOR MOBILE AGENTS MANAGEMENT BASED ON A NETWORK-CENTRIC APPROACH.....	284
 POWER ENGINEERING	
Abdulin M.Z., Kunyk A.A.	
WAYS OF CREATING UNIVERSAL AND COMBINED BURNING DEVICES.....	289
Boianivskyi V.P., Trokoz Ya.Ye.	
INVESTIGATION OF HEAT TRANSFER MECHANISMS DURING LAMINAR FILM CONDENSATION OF WATER VAPOR IN HORIZONTAL TUBE HEAT EXCHANGERS.....	295
Dulskyi A.I., Storozhuk M.S.	
ALTERNATIVE FUELS IN ENERGY, PROBLEMS AND PROSPECTS.....	300
Siryi O.A., Kobylianska O.O.	
WAYS OF IMPROVING STABILITY OF COMBUSTION IN STABILIZER ELEMENTS OF DIRECT FLOW BURNER SYSTEMS.....	310
 METALLURGY	
Teslenko O.I., Kuts H.O.	
TECHNICAL AND ECONOMIC ASSESSMENT OF THE COKE SUBSTITUTION TECHNOLOGIES IN THE BLAST FURNACE PRODUCTION.....	316
 CHEMICAL TECHNOLOGY	
Andriianova M.V., Holovenko V.O., Rudnieva L.L., Sykhyy K.M.	
DEVELOPMENT OF HORSE CHESTNUT OIL EXTRACTION TECHNOLOGY WITH ITS FURTHER USE IN THE HAND CREAM RECIPE.....	322

Vorobiova V.I., Khrokalo L.A., Vinnichuk E.V., Kravchenko F.E., Fedulova V.S., Vasyliiev H.S., Skyba M.I. SYNTHESIS OF GOLD NANOPARTICLES USING EXTRACT OF GRAPE PROCESSING WASTE BASED ON LOW-TEMPERATURE EUTECTIC SOLVENT, THEIR ANTIBACTERIAL PROPERTIES AND TOXICITY	328
Drobyazko A.A., Linyucheva O.V., Byk M.V. OBTAINING AND STUDY AN OPTICAL PROPERTIES OF BLACK COATINGS ON ALUMINUM ALLOYS.....	334
Maizelis A.O. CORROSION PROPERTIES OF [(CU-ZN) _{BASE} /(CU-ZN) _{ADD}] _N MULTILAYER COATINGS	340
Cherkashina G.M., Lebedev V.V., Kapilov S.O., Bliznyuk O.V., Kryvobok R.V. MODERN COMPOSITE MATERIALS FOR THE MANUFACTURE OF INDIVIDUAL ARMOR PROTECTION.....	345
TECHNOLOGY OF FOOD PROCESSING AND CONSUMER GOODS INDUSTRY	
Svyatnenko R.S., Marynin A.I., Shevchenko O.Yu., Poznyak O.M., Litvynchuk S.I. MICROBIOLOGICAL AND PHYSICO-CHEMICAL PROPERTIES OF BUCKWHEAT AND ACACIA HONEY	350
TRANSPORT	
Voitsehovskiy V.S., Borets I.V., Valko A.M., Gabrielova T.Yu. COMPREHENSIVE SYSTEM FOR ASSESSING THE EFFECTIVENESS OF AIRLINE CARGO FLOW MANAGEMENT.....	355
Kyryllova O.V., Kyryllova V.Yu. UPDATE OF THE PROBLEM OF PROFESSIONAL TRAINING OF PERSONNEL FOR THE TRANSPORT INDUSTRY OF UKRAINE THROUGH THE PRISM OF THE NEW LIST OF FIELDS OF KNOWLEDGE AND SPECIALTIES FOR WHICH HIGHER EDUCATION ACQUIRES ARE TRAINED.....	361
Kunda N.T. OPTIMIZATION OF THE FUEL COMPONENT COSTS OF INTERNATIONAL ROAD TRANSPORTATION.....	370
Fomin O.V., Baranov I.O., Miroshnykova M.V. ENSURING SAFE OPERATION OF RAILWAY ROLLING STOCK BASED ON ASSESSMENT OF THE RESOURCE OF ITS BASIC PARTS.....	378
Shybaiev O.H., Koskina Yu.O., Kravchenko O.A., Akimov K.S. COAL TURNOVERS IN UKRAINIAN PORTS: RETROSPECTIVE REVIEW AND CURRENT STATE.....	386
Shkurko Ye.L., Bezklubna N.L. ECOLOGICAL SUSTAINABILITY OF PORT INFRASTRUCTURE: IMPLEMENTATION OF GREEN TECHNOLOGIES AND ENERGY-EFFICIENT SOLUTIONS.....	391
INFORMATION ABOUT AUTHORS.....	400

UDC 656:001.89

DOI <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2023.5/01>

Gahramanov S.A.

Mingachevir State University

APPLICATION OF INFORMATION TECHNOLOGIES IN CARRYING OUT SPATIAL IDENTIFICATION OF MOTOR VEHICLES

In the research, it was noted that the identification of a vehicle, equipment and cargo is a means of identifying one or more objects or subjects based on a number of important characteristics. The main characteristics of an object (subject) can be placed on a certain physical carrier, which are special devices that have the signs of an object or subject (silhouette (drawing) of a vehicle, its number sign, fingerprints of a person) or identification information (magnetic card, electronic key). A set of characteristics that define an object or a subject within a certain identification system is called an identifier; also, an identifier is understood as a physical device containing identifying information.

The identification process is carried out by determining the identification information of the object (reading from the identifier) and comparing it with the information known in the system; as a result of this comparison, it is determined that the object belongs to a certain group. One component of object recognition is its identification, the purpose of which is to confirm that the identifier actually belongs to a recognized object.

In the research work, automatic identification devices were used to remotely monitor and control the route of movement of the car, as well as its location in any coordinate system is regularly determined. To solve the problem of determining the location of the car while it is in motion, it is equipped with a set of sensors that automatically record movement parameters with a certain interval, transmit them to the center to control movement and determine the current location. Relative or absolute parameters were used to determine the location of the car. The article emphasized that most vehicles are equipped with sensors to determine relative or absolute parameters.

Key words: transport, road, coordinate system, tracking, relative parameters, absolute parameters, sensors.

Introduction. Automatic identification of objects of motor transport systems significantly expands the possibilities of monitoring and managing transport and logistics processes [1]. Electronic identification technologies make it possible to track goods in real time both at the stage of their storage and during transportation, which makes it possible to plan and manage cargo flows with maximum efficiency [12]. Global positioning technologies facilitate vehicle route monitoring procedures, including traffic management on toll road sections. Obtaining the most efficient automatic identification, as well as appropriate technical equipment, selection and use of economical information technologies is an important issue in the activities of a motor transport company [3].

Means of automatic determination of the parameters of motor traffic flows are an effective basis for organizing and regulating traffic flows based on the current situation on the road. This is especially important for large megacities, which do not have sufficient passability in the urban road network [10].

In order to remotely track and control the route of movement of the car, not only automatic identification is required, but also its location is

regularly determined in any coordinate system. To solve this problem, the tools are equipped with a set of sensors that automatically record movement parameters at certain intervals, transmit them to the center to control the movement, and determine the current location (which is most often presented as the coordinates of the object) [5]. The parameters, the current location of which is determined, can be relative or absolute (Figure 1); most vehicles are equipped with sensors to determine the parameters of both types.

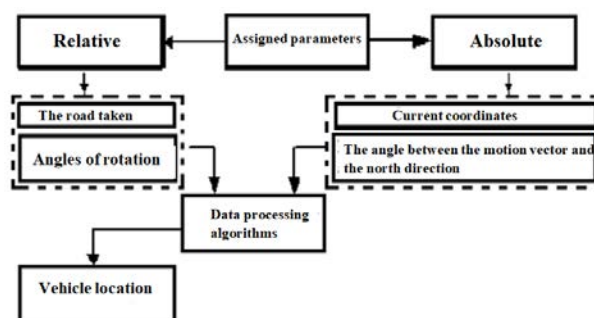


Fig. 1. The procedure for determining the current state of the car

Relative parameters make it possible to calculate the change of coordinates for a certain period of time; adding this change to the initial coordinates, they get the current coordinate of the vehicle. The occurrence of an error in the calculation process is inevitable, and this increases with an increase in the distance traveled. For this reason, periodic synchronization is required: errors accumulated as a result of accurate determination of current coordinates by any other methods and methods are reduced to zero; but after that the calculation starts again based on the initial coordinates. Determination of relative parameters, as a rule, is carried out by means of the moving object itself, without resorting to third-party information systems.

Absolute parameters allow to calculate current coordinates directly and continuously with high accuracy, but require communication with systems located outside the vehicle.

Research methods. Relative parameters in determining the current location require synchronous determination of most travel distances, turning angles and, moreover, with very short time intervals between measurements. To determine the distance traveled, distance sensors on the transmission case and tires are used [14]. *Electromagnetic transmission sensors* generate a voltage proportional to the speed of rotation of the transmission element. Moreover, the relationship between the speed of rotation and the resulting voltage is not always linear, and in addition, the spread of voltage at low speeds can be unacceptably large. *Hall sensors* are related to transmission and are characterized by high accuracy, but require protection from temperature and magnetic fields, as well as accurate installation and the absence of displacements during operation; these requirements limit the scope of transmission sensors. *Tire sensors* are very easy to install and maintain; *rotation sensors* create tension linearly with the speed of the tire, and *impulse sensors* give a single impulse at each complete rotation of the tire (the distance traveled is determined by the number of pulses recorded). The angle of rotation is determined using *gyroscopes*, which have different principles of action; vibration-type gyroscopes are more common in motor vehicles.

The absolute parameters of positions are usually coordinates derived from global positioning systems [9]. Currently, there are GPS (Global Positioning System) and GLONASS (Global Navigation Satellite System) systems in our country. The basic principle in determining the current location is to compare the reception time of signals from several satellites operating in the corresponding system and generating stable and synchronous signals corresponding to each other. Based

on the analysis of the time between the reception of the signal from different satellites, the position of which is known, it is possible to determine at what point on Earth the intersection of the rays occurs—the signal trajectories; this is equivalent to determining the coordinates of a particular point. Based on the analysis of the time between receiving the signal from different satellites whose position is known, it is possible to determine the signal trajectories at which point of the Earth the rays intersect; this is equivalent to specifying the coordinates of a certain point. Typical GPS positioning error for 2016 is 2–4 m; for GLONASS, this indicator is slightly higher (from 3 m to 6 m), the error is expected to be reduced to 0.6 m by 2021.

Despite the convenience of using absolute positioning parameters, their determination can be achieved with temporary difficulties. In unfavorable conditions (in a tunnel or under dense foliage, low cloud cover, interference from particularly strong magnetic storms), signals from satellites can come with significant deficiencies (up to complete loss) [11]. Therefore, the most appropriate is a combination of relative and absolute parameters that guarantee acceptable accuracy of the vehicle position when determining the current position of the vehicle in any situation. This approach is applied to *current positioning integration systems* based on motion and rotation sensors, two independently identified and used in the global positioning system, the results are compared (usually based on a mathematical tool that applies a Kalman filter) and then finally the corrected coordinates are calculated. If the sensors on the vehicle cannot be used for any reason, a different *current positioning system* can be implemented that receives signals from both satellites and the base station. Such a known and invariable (different from satellites) coordinating support station is used to refine and correct the coordinates established in the global positioning system.

Spatial identification of vehicles is often carried out when using toll areas of highways [10]. Payment systems based on automatic identification provide significantly higher flexibility for their customers compared to traditional systems that provide physical control of vehicle access to toll roads. In addition to location identification, automatic tariff payments are made, including determining the type of vehicle, calculating the amount of payment, making settlements and conducting appropriate financial transactions [11].

An example of a system using DSRC (Dedicated Short Range Communication) technology and successfully operating in a number of European countries is shown in Figure 2. The initial section

of the toll road (zone I) is equipped with means for recording the fact of the passage of the vehicle and determining its type (the size of the subsequent toll depends on it); in this area, video equipment with image recognition software is also used, along with motion sensors installed inside the road [2]. In the next part (zone II), communication in different ranges is carried out with the car's on-board device: microwave (data exchange rate up to 0.5 Mbit/s) or infrared (up to 10 Mbit/s). After establishing a connection, the vehicle is identified, its compatibility with the parameters defined in zone I is checked, the payment information is determined and the payment is made automatically. If automatic payment is not allowed by the user, an invoice is created in the system and sent by the on-board device to the address specified in the process of data exchange, at which time the deferred payment procedure is used. If it is not possible to contact the on-board device, Zone III takes a photo and recognizes the vehicle number, after which the owner of the vehicle is identified from a single database and a payment invoice is sent to him [6].

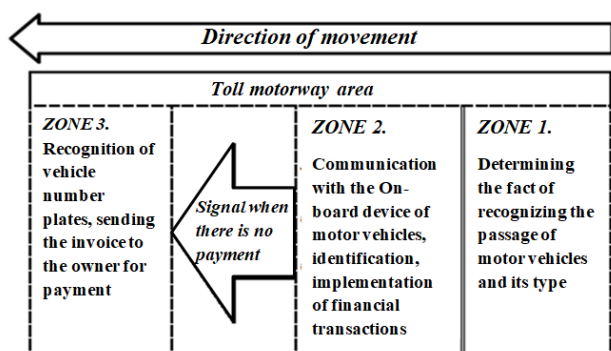


Fig. 2. Scheme of use of toll roads on DSRC technologies

Scientific novelty of the research work. The use of DSRC technology requires equipping all toll areas with appropriate devices for organizing communication and recognizing moving objects [4]. GSMC (Global System for Mobile Communication) technology is free from this deficiency, when information is obtained about the position of the vehicle in global positioning systems, and on-board devices exchange information through mobile networks. Payment is made in deferred mode. This technology is effective in the event of a small number of vehicles not equipped with on-board support devices; for such vehicles, a small network of mobile control posts or DSRC posts is envisaged. This technology is used in Germany; this allows to differentiate the amount of payment depending on many factors (number of

vehicle axles, category according to environmental standards, etc.) [8].

A very advanced system of indicators that is taken into account when determining the amount of payments is the LVSA technology, which is also widespread in Switzerland [12]. Here, at the same time, the on-board device is equipped with a tachograph that measures the distance covered by the paid moving part; its readings are automatically checked by the integrated global positioning device. The distance traveled is periodically determined and, based on it, the amount of payment is determined. The determined amount of payment is stored on a special card of the owner of the vehicle. The cardholder is obliged to periodically transfer the accumulated data to the system control center, where the correctness and completeness of payment for the use of the toll road is monitored.

Another direction of the widespread use of automatic identification is road traffic management. Personal identification is not required here at all, it is enough to determine the fact and time of the passage of the car through a certain section of the road, and possibly add its type. For this purpose, sensors are used that can be installed both on the side of the road and under the road. According to the physical principle of their action, the sensors installed on the road are electromechanical, magnetic, pneumoelectric and inductive; the latter type is more widespread. The inductive sensor is made of high-frequency (up to 200 kHz) alternating current conductive material and fixed in a certain shape; the circuit diagram of inductive sensors and the scheme of their various connections are shown in Figure 5.5. During the movement of a heavy metal object, the density of oscillations on the sensor changes, which is recorded by the controller. The sensitivity of the sensor, as well as its shape, is affected by the mass and speed of the object passing over it, so sensors with the most suitable shape are used to detect all kinds of vehicles. (Figure 3, b).

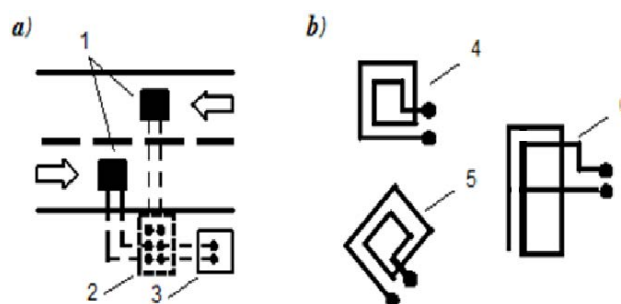


Fig. 3. Road measuring devices:
 a) the scheme installed on the road; 1 – measuring devices; 2 – installation well; 3 – controller;
 b) types of measuring devices; 4 – measuring devices for the car; 5 – measuring devices for bicycles; 6 – measuring devices at the railway crossing

The detection area of inductive sensors can be small (a short circle for identifying vehicles passing through a certain section of the roadway) and large (several long and wide areas that determine the presence of a vehicle in a control zone up to 20 m long). In the traffic management system, inductive sensors (determined according to the queue lengths at the traffic lights) are used to determine the characteristics of the traffic flow (its intensity and volume of traffic), to identify traffic jams and to adjust the traffic lights according to the actual traffic situation [13].

Sensors installed on the road are divided into acoustic, infrared, radar and video detectors according to the principle of movement. The detectors installed above each lane and combined have a wide range of possibilities to identify vehicles. Here, various types of sensors are used to determine a wide range of traffic flow parameters. The speed of movement is measured with the help of microwave radar [12]. The ultrasound detector scans images of vehicles and classifies them by type, as well as registers stationary objects.

Multichannel infrared detectors calculate the switching on and off of the radar, as well as the degree of occupancy of the lanes and the intensity of movement.

Conclusions. The conclusion from the research suggests that for remote tracking and control of a vehicle's route, automatic identification alone does not fully satisfy the requirement, and its location in any coordinate system must be determined regularly for accuracy. To solve the problem, a set of sensors was used, which automatically record movement parameters at certain intervals, transmit them to the center to control the movement, and determine the current location (which is most often represented as the coordinates of the object). At the end, relative or absolute parameters were taken as parameters that determine the current location of cars. For the determination of the mentioned parameters, it is imperative to install the selected sensors on most vehicles.

Bibliography:

1. S.K.Gozalov, B.F.Namazov, Sh.H.Hasanov, R.T.Mammadov "Car construction features". Textbook. – Baku, "OSKAR" NPM, 2014, – 384 p.
2. B.F.Namazov, R.K.Gasimov "Theory and calculation of motion of cars". Baku: Zardabi publ., 2012. 337p.
3. HowStuffWorks. URL: <https://auto.howstuffworks.com/auto-parts/brakes/brake-types/disc-brake1.html>
4. G. Amato, F. Carrara, F. Falchi, C. Gennaro, C. Vairo Car parking occupancy detection using smart camera networks and Deep Learning Proceedings – IEEE Symposium on Computers and Communications, 2016-August (Aug. 2016), pp. 1212-1217
5. Z. Chen, J.C. Xia, B. Irawan Development of fuzzy logic forecast models for location-based parking finding services Math. Probl Eng. (2013), p. 2013
6. A. Sumalee, H.W. Ho Smarter and more connected: future intelligent transportation system IATSS Res., 42 (2) (Jul. 01, 2018), pp. 67-71 Elsevier B.V.
7. E. Ismagilova, L. Hughes, N.P. Rana, Y.K. Dwivedi Security, privacy and risks within smart cities: literature review and development of a smart city interaction framework Inf. Syst. Front, 22 (4) (Jul. 2020), pp. 1-22
8. Vlasov, V.M. Information technologies in automobile transport / V.M. Vlasov, D.B. Efimenko, V.N. Bogumil. – M.: Publishing Center "Academy", 2014. – 256 p.
9. Pervukhin, D.A. Information networks and telecommunications / D.A. Pervukhin, O.V. Afanaseva, Y.V. Ilyushin. – SPB.: Publishing house "Satish" 2015, – 267 p.
10. Gorev, A.E. Information technologies in transport. Electronic identification of vehicles and transport equipment: study guide / A.E. Gorev. – St. Petersburg: Publishing House SPBGACU, 2010. – 96 p.
11. Shangin, V.F. Information security and protection of information / V.F. Shangin. – M.: DMK Press, 2014. – 702 p.
12. Waksman, S.A. Information technologies in the management of urban public passenger transport (tasks, experience, problems) / ed. S.A. Waksman. – Yekaterinburg: AMB Publishing House, 2012. – 250 p.
13. Zhang, X.; Onieva, E.; Perillos, A.; Osaba, E.; Lee, V. Hierarchical fuzzy rule-based system optimized with genetic algorithms for short term traffic congestion prediction. Transp. Res. C Emerg. Technol. 2014, 43, 127–142.
14. Habtie, A.B.; Abraham, A.; Midekso, D. Artificial Neural Network Based Real-Time Urban Road Traffic State Estimation Framework. In Computational Intelligence in Wireless Sensor Networks; Springer: Cham, Switzerland, 2017; pp. 73–97.

Гахраманов С.А. ЗАСТОСУВАННЯ ІНФОРМАЦІЙНИХ ТЕХНОЛОГІЙ ПРИ ПРОВЕДЕННІ ПРОСТОРОВОЇ ІДЕНТИФІКАЦІЇ АВТОТРАНСПОРТНИХ ЗАСОБІВ

У дослідженні було зазначено, що ідентифікація транспортного засобу, обладнання та вантажу є засобом ідентифікації одного чи кількох об'єктів чи предметів за низкою важливих ознак. Основні характеристики об'єкта (предмета) можуть бути розміщені на певному фізичному носії, що є спеціальними пристроями, що мають ознаки об'єкта чи суб'єкта (силует (малюнок) транспортного засобу, його номерний знак, відбитки пальців людини) або ідентифікаційна інформація (магнітна картка, електронний ключ). Ідентифікатором називається сукупність характеристик, що визначають об'єкт або суб'єкт у певній ідентифікаційній системі; також ідентифікатор розуміється як фізичний пристрій, що містить ідентифікаційну інформацію.

Процес ідентифікації здійснюється шляхом визначення ідентифікаційної інформації об'єкта (зчитування з ідентифікатора) та її порівняння з інформацією, відомою в системі; в результаті цього порівняння визначається приналежність об'єкта до певної групи. Одним із компонентів розпізнавання об'єкта є його ідентифікація, метою якої є підтвердження того, що ідентифікатор дійсно належить розпізаному об'єкту.

У дослідницькій роботі використовувалися пристрої автоматичної ідентифікації, які дистанційно відстежували та контролювали маршрут руху автомобіля, а також регулярно визначали його місцезнаходження в будь-якій системі координат. Для вирішення проблеми визначення місцезнаходження автомобіля під час його руху він оснащений набором датчиків, які автоматично з певним інтервалом фіксують параметри руху, передають їх у центр для контролю руху та визначення поточного місцезнаходження. Для визначення місця розташування автомобіля використовувалися відносні або абсолютні параметри. У статті підкреслюється, що більшість транспортних засобів оснащені датчиками для визначення відносних або абсолютних параметрів.

Ключові слова: транспорт, дорога, система координат, стеження, відносні параметри, абсолютні параметри, датчики.

ГАЛУЗЕВЕ МАШИНОБУДУВАННЯ

UDC 539.3

DOI <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2023.5/02>

Petryk V.O.

National Technical University of Ukraine
“Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute”

Trubachev S.I.

National Technical University of Ukraine
“Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute”

Kolodezhnyi V.A.

National Technical University of Ukraine
“Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute”

DETERMINATION OF STRESS-STRAIN STATE OF SHELLS TAKEN INTO ACCOUNT OF STRINGERS AND FRAMES

A methodology for engineering calculations of the strength of cylindrical shells presented, taking into account a frame consisting of a set of stringers and frames. One of the ways to solve this type of problem is to use the method of reduced structural rigidity, when the reinforced shell replaced by a solid one with a rigidity equivalent to the original one. The use of shells of equivalent rigidity in calculation models is justified if it is necessary to evaluate the stress-strain state of objects attached to the shell. The given characteristics of elasticity and rigidity calculated in this work. Equations obtained that describe the stability of cylindrical shells taking into account the frame of stringers and frames. The finite element method used to calculate cylindrical shells supported by stringers and frames. The use of the finite element method makes it possible to calculate the stress-strain state of a mechanical system, taking into account all design features, with full consideration of boundary conditions and specified loads. As an example, the approximation of a tetrahedral finite element shown. The use of the finite element method in solving problems of the strength of reinforced shells leads to a significant increase in the number of finite elements. This leads to too high demands on computing technology in terms of memory capacity and performance. Thus, it is advisable to develop economical and effective methods for calculating the stress-strain state of complex mechanical systems that combine analytical and numerical methods that complement each other and make it possible to evaluate the strength of structures at minimal cost.

Key words: stress-strain state, shell, stringers, frames, finite element method.

Formulation of the problem. The tail and side engine compartments of rockets and aircraft fuselages made in the form of frame cylindrical shells. The frame in them is a longitudinal set of stringers and a transverse set of frames. In practice, three types of frames are widely used:

1. Stringers and frames having approximately equal stiffness characteristics, evenly distributed in the longitudinal and transverse directions.
2. Frames have more rigid characteristics than stringers, and they are located much less frequently than stringers.
3. The lightweight frame set of the first type complemented by a set of sparsely spaced reinforced frames and stringers.

Taking into account the complex geometry of structures, an urgent problem arises in constructing an engineering methodology for calculating the strength and stability of frame cylindrical shells, widely used in aircraft construction.

Analysis of recent research and publications. Methods for calculating mechanical systems for stability make it possible quite successfully solve problems for rod and shell structures [1]. The widespread use of reinforced shells in aircraft structures explained by the fact that, with the same mass as smooth shells, they are able to withstand higher levels of compressive stresses. However, the analytical solution to this problem becomes more complex [2]. When using analytical approaches to

solve the problem under consideration, one has to face the problem of summing infinite series [2]. Most numerical procedures are based on the finite element solution method [3–7], which is more universal, but requires a justified formation of a finite element model in relation to the problem being solved, therefore, with regard to labor costs, it is important which finite element model is used in the calculations. This work is devoted to the development of analytical and numerical approaches to solving problems of the strength of cylindrical shells and is a development of works [1, 2, 7].

Task statement. The purpose of the article is to determine the main resolving equations and an algorithm for solving the problem of the strength of frame cylindrical shells. There are not enough studies that propose engineering methods for assessing the strength and stability of cylindrical shells taking into account stringers and frames, which allow analytically solving this problem quickly and efficiently in terms of labor costs.

Outline of the main material of the study. Let us consider shells, the reinforcement set of which is located along the lines of the main curvatures. Such shells considered structurally orthotropic. Methods for calculating such shells based on well-known methods for calculating smooth shells. To do this, the reinforced shell replaced by some equivalent smooth shell with different rigidity characteristics along the lines of the main curvatures. After this, the well-developed apparatus of the theory of smooth shells applied to the equivalent shell. In the future, we will consider such shells, the supporting frame of which forms a regular mesh. Let us consider the determination of elastic moduli for a cylindrical shell under the action of tension-compression in the axial direction. When a smooth shell compressed by force P , force does work equal to $A = P\Delta l$, where Δl – is the shortening of the shell.

It is known, that

$$\Delta l = \Sigma l = \frac{Pl}{E_x F} = \frac{Pl}{2\pi R \delta E_x}.$$

Here E_x – Young’s modulus, F – cross-sectional area, R – shell radius, δ – shell wall thickness, l – shell length. Then the work is equal

$$A = \frac{P^2 l}{2\pi R \delta E_x}.$$

When compressed by the force of the reinforced shell, it will be partially absorbed by the stringers and partially by the skin. The total work of these forces is equal to

$$\bar{A} = nP_1 \Delta l_1 + P_2 \Delta l_2,$$

taking into account that

$$\begin{cases} \Delta l_1 = \varepsilon_1 l = \frac{P_1 l}{E_1 F_1}, \\ \Delta l_2 = \varepsilon_2 l = \frac{P_2 l}{E_2 F_2}. \end{cases}$$

We have

$$\bar{A} = \left(\frac{nP_1^2}{E_1 F_1} + \frac{P_2^2}{E_2 F_2} \right) l,$$

where n – is the number of stringers, F_1 – is the cross-sectional area of the stringers, F_2 – is the cross-sectional area of the shell, E_1 – is the Young’s modulus of the stringer material, E_2 – is the Young’s modulus of the shell material.

But also $A = \bar{A}_2$, in addition,

$$\begin{cases} \Delta l_1 = \Delta l_2 = \Delta l, \\ nP_1 + P_2 = P. \end{cases}$$

Taking this into account, we obtain an expression for the reduced Young’s modulus E_x of an equivalent smooth shell:

$$E_x = E_2 \left(1 + \frac{nF_1 E_1}{2\pi R \delta E_2} \right).$$

Similarly, we can obtain an expression for Young’s modulus E_y :

$$E_y = E_2 \left(1 + \frac{F_3 E_3}{a_2 \delta E_2} \right),$$

where E_3 – is the Young’s modulus of the frame material, F_3 – is the cross-sectional area of the frame, and a_2 – is the length of the section between adjacent frames.

For bending rigidity characteristics, the following relations are usually accepted [1, 2]

$$\begin{cases} D_y = \frac{E_2 \delta^3}{12(1 - \mu_x \mu_y)} + \frac{E_3 I_3}{a_2}, \\ D_x = \frac{E_2 \delta^3}{12(1 - \mu_x \mu_y)} + \frac{E_1 I_1}{a_1}, \end{cases}$$

where I_1 – is the moment of inertia of the cross-sectional area of the stringer relative to its central axis, parallel to the tangent to the shell circumference, I_3 – is the moment of inertia of the cross-sectional area of the frame relative to its central axis, parallel to the generatrix of the shell, a_1 , a_2 – are the distances between adjacent stringers and frames, respectively, μ_x , μ_y – Poisson’s ratios. Usually $\mu_x = \mu_y = \mu$, for shear and torsional rigidities, the expressions are taken:

$$D_{kp} = \frac{G_2 \delta^3}{12}, \quad G_2 = \frac{E_2}{2(1 + \mu)}.$$

Taking into account the introduced notation, it is possible to express the internal forces in a reinforced shell in the form known in the theory of shells [1, 2]

$$\begin{cases} N_x = \frac{E_x \delta}{1 - \mu} (\epsilon_x + \mu \epsilon_y), \\ M_x = -D_x (\lambda_x + \mu \lambda_y), \\ N_y = \frac{E_y \delta}{1 - \mu^2} (\epsilon_y + \mu \epsilon_x), \\ M_y = -D_y (\lambda_y + \mu \lambda_x), \\ N_{xy} = G_2 \epsilon_{xy}, \\ M_{xy} = -2D_{\kappa p} \lambda_{xy}. \end{cases} \quad \begin{cases} \frac{\partial M_x}{\partial x} + 2 \frac{\partial M_{xy}}{\partial y} = 0, \\ \frac{\partial M_y}{\partial y} + 2 \frac{\partial M_{xy}}{\partial x} = 0. \end{cases}$$

For the components of deformations and curvatures we have the usual dependencies

$$\begin{cases} \epsilon_x = \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{w}{R_1}, & \chi_x = -\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} - \frac{w}{R_1^2}, \\ \epsilon_y = \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{w}{R_2}, & \chi_y = -\frac{\partial^2 w}{\partial y^2} - \frac{w}{R_2^2}, \\ \epsilon_{xy} = \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x}, & \chi_{xy} = -\frac{\partial^2 w}{\partial x \partial y}, \end{cases}$$

here u, v – tangential displacements, w – deflection, R_1, R_2 – corresponding radii of curvature.

To obtain differential equations of equilibrium and compatibility of deformations for reinforced shells, the same methods are usually used as for smooth shells. Thus, you can get:

$$\begin{aligned} \frac{1}{R_1} \frac{\partial^2 \varphi}{\partial y^2} + \frac{1}{R_2} \frac{\partial^2 \varphi}{\partial x^2} + D_x \frac{\partial^4 w}{\partial x^4} + 2(\mu D_y + 2D_x) \frac{\partial^2 w}{\partial y^2 \partial x^2} + D_y \frac{\partial^4 w}{\partial y^4} &= q, \\ \frac{1}{E_y} \frac{\partial^2 \varphi}{\partial x^2} + \left(\frac{1}{G} - \frac{\mu_x}{E_x} - \frac{\mu_y}{E_y} \right) \frac{\partial^4 \varphi}{\partial x^2 \partial y^2} + \frac{1}{E_x} \frac{\partial^4 \varphi}{\partial y^4} &= \frac{\delta}{R_1} \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + \frac{\delta}{R_2} \frac{\partial^2 w}{\partial x^2}, \end{aligned}$$

The above formulas use the same notation as in the equations of V.Z. Vlasov for isotropic shells, where φ – is a function of stress and q – is the normal load [1, 2].

In stability problems, the normal load q consists of projections of membrane forces arising in the middle surface of the shell from a given external load and is determined by the formula:

$$q = -N_x^0 \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} - N_y^0 \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} - 2N_{xy}^0 \frac{\partial^2 w}{\partial x \partial y},$$

In general terms, the procedure for solving the problem of calculating shells for stability will be reduced to the following. It is necessary to set an expression for the deflection, which would describe as fully as possible the nature of the expected wave formation on the surface of the shell under a given external load. From a geometrical point of view, the expression for deflection should be the equation of the contour of the dents and convexities that form on the surface of the shell due to buckling. On the contour of dents and bulges, the deflection should be zero. If part of the dent contour coincides with the free edge of the shell, then in this case $w \neq 0$, the transverse forces are equal to zero:

It should be emphasized that solving the stability problem for reinforced shells with arbitrary boundary conditions requires the use of numerical methods, since a solution can be obtained analytically only for those cases where the solution can be represented as a Fourier series.

To solve a problem using the finite element method, you first need to build a 3D model. An example of 3D modeling is shown in Fig. 1.

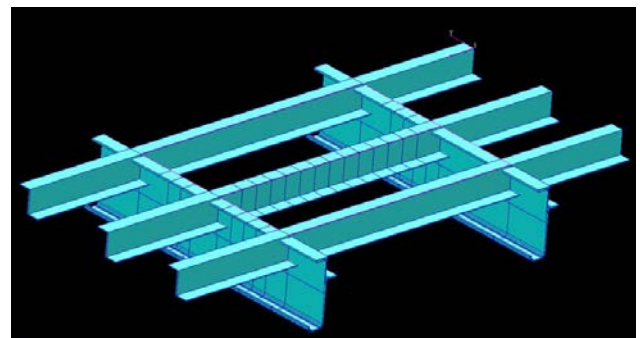


Fig. 1. Frame modeling

Next, the standard FEM procedure is used for calculations [3–6].

Separation of the structure into separate finite elements is a very responsible stage of the calculation. Both the accuracy of the calculation and its laboriousness depend on the correct division. Since this operation has no theoretical basis, its effectiveness depends entirely on the engineering skills of the person engaged in it. Although the use of small elements increases the accuracy of the calculation, it increases the number of unknowns and the order of equations for their determination. In this regard, it is necessary to choose the dimensions of the elements in accordance with the gradients of those values that are determined. In places where the sought value changes quickly, the sizes of the elements are reduced. To build a finite-dimensional model, you can use three-dimensional finite elements in the form of a tetrahedron, within which a linear displacement field is specified:

$$\begin{aligned} u_x &= f_1 + f_2 x + f_3 y + f_4 z, \\ u_y &= f_5 + f_6 x + f_7 y + f_8 z, \\ u_z &= f_9 + f_{10} x + f_{11} y + f_{12} z, \end{aligned}$$

where $f_1 \dots f_{12}$ – are arbitrary constants. By equating the nodal points u_x, u_y, u_z to the corresponding nodal displacements, it is possible to express constants in terms of nodal displacements v^e and obtain a

dependence in the form of $u = \pm v^e$. Using the usual procedure allows you to find the stiffness matrix of such an element. In the three-dimensional case all six deformation components are taken into account.

The expressions for the stresses inside each element in the general view have the form

$$\sigma^{(m)} = C^{(m)}\varepsilon^{(m)} + \sigma_0^{(m)}$$

where C – is the elasticity matrix of element m , and $\sigma_0^{(m)}$ – is the initial stress in the middle of the element.

In a structure consisting of different materials, each element can have its own elasticity matrix.

Conclusions. The paper provides an analytical description of the solution to the problem of stability of cylindrical shells, taking into account stringers and frames. Solving equations are obtained. It is shown that numerical methods, in particular the finite element method, should be used to solve the problems of the stability of rigid cylindrical shells with arbitrary boundary conditions.

Bibliography:

1. Чемерис О. М., Колодежний В. А., Трубочев С. І. Будівельна механіка машин. Київ, 2017. 258 с. URL: <http://ela.kpi.ua/handle/123456789/18961>
2. Амиро І. Я., Заруцький В. А., Полаков П. С. Ребристі циліндричні оболонки. Київ : Наукова думка, 1973. 248 с.
3. Zienkiewicz O. C., Taylor R. L. The Finite Element Method. Vol. 1: The Basis. – Oxford : BH, 2000. 689 p.
4. Zienkiewicz O. C., Taylor R. L. The Finite Element Method. Vol. 2: Solid Mechanics. – Oxford : BH, 2000. 459 p.
5. Bathe Klaus-Jürgen. Finite Element Procedures. Second Edition, published by K.J. Bathe. Watertown : MA, 2014. 1043 p.
6. Дубенец В. Г., Хильчевский В. В., Савченко О. В. Основы метода скінченних елементів. Чернігів : ЧДТУ, 2003. 346 с.
7. Яхно Б. О., Трубочев С. І. Напружено-деформований стан циліндричних товстостінних перфорованих оболонок. Вісник НТУУ "КПІ". Машинобудування. 2013. Вип. 67. С. 126–130.

Петрик В.О., Трубочев С.І., Колодежний В.А. ВИЗНАЧЕННЯ НАПРУЖЕНО-ДЕФОРМОВАНОГО СТАНУ ОБОЛОНОК З УРАХУВАННЯМ СТРИНГЕРІВ І ШПАНГОУТІВ

Представлено методику інженерного розрахунку на міцність циліндричних оболонок з урахуванням каркасу, що складається з набору стрингерів і шпангоутів. Одним із способів розв'язання даного типу завдань є використання методу наведеної жорсткості конструкції, коли підкріплена оболонка замінюється суцільною з жорсткістю, еквівалентною початковій. Використання еквівалентних за жорсткістю оболонок у розрахункових моделях виправдане, якщо необхідно оцінити напружено-деформований стан об'єктів, приєднаних до оболонок. У роботі розраховані наведені характеристики пружності та жорсткості. Отримані рівняння, що описують стійкість циліндричних оболонок з урахуванням каркасу зі стрингерів і шпангоутів. Для розрахунку циліндричних оболонок, підкріплених стрингерами і шпангоутами, застосовується метод скінченних елементів. Застосування методу скінченних елементів дає можливість розрахувати напружено-деформований стан механічної системи з урахуванням усіх конструктивних особливостей, з повним урахуванням граничних умов і заданих навантажень. Як приклад показана апроксимація тетраедричного скінченного елемента. Використання методу скінченних елементів при вирішенні задач міцності підкріплених оболонок призводить до значного зростання кількості скінченних елементів. Це призводить до занадто високих вимог до обчислювальної техніки, з точки зору обсягу пам'яті та швидкодії. Таким чином, доцільно розробляти економічні та ефективні методи розрахунку напружено-деформованого стану складних механічних систем, у яких поєднуються аналітичні та чисельні методи, які доповнюють один одного та дають можливість оцінювати міцність конструкцій з мінімальними витратами.

Ключові слова: напружено-деформований стан, оболонка, стрингери, шпангоути, метод скінченних елементів.

АВІАЦІЙНА ТА РАКЕТНО-КОСМІЧНА ТЕХНІКА

УДК 629.7.01

DOI <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2023.5/03>

Бойко С.М.

Національний університет «Запорізька політехніка»

Котов О.Б.

Національний університет «Запорізька політехніка»

Ищенко С.О.

Національний університет «Запорізька політехніка»

Гладкий Ю.М.

Approved Training Organization «ГЛОБАЛ» Міжнародні Авіаційні Підготовки»

Шарипенко Ю.В.

Національний університет «Запорізька політехніка»

Гвоздік С.Д.

Кременчуцький льотний коледж Харківського національного університету внутрішніх справ

ОСОБЛИВОСТІ РОЗВИТКУ ЕКСПЛУАТАЦІЇ ПОВІТРЯНИХ СУДЕН МАЛОЇ АВІАЦІЇ В КОНТЕКСТІ РЕГІОНАЛЬНИХ ПЕРЕВЕЗЕНЬ

Стаття присвячена питанням синтезу підходів розбудови застосування повітряних суден малої авіації, у тому числі вертольотів в регіональному аспекту на теренах України. У статті визначено основні вимоги, що пред'являються до повітряних суден, які допускаються до польотів. Акцентовано увагу на те, що урядові та неурядові міжнародні організації в межах своєї компетенції реалізують взаємодію з ІСАО, проводячи в регіони її політику та стандарти, що стосуються діяльності цивільної авіації. Відповідно, зазначені організації здійснюють допомогу в тих питаннях, які виникають у ході діяльності міжнародної цивільної авіації через особливості того чи іншого регіону. У статті, зважаючи на всі зазначені аспекти, умови та чинники, запропоновано підхід щодо визначення тренду змін показників надійності різних типів вертольотів дасть можливість розробляти прогнози рівня надійності повітряних суден та встановлювати цільові значення, які необхідно підтримувати або покращувати з метою вдосконалення відповідної авіаційної системи. Між тим, у статті за результатами досліджень доведено необхідність створення сучасної інфраструктури для обслуговування та безпечної експлуатації та підтримки льотної придатності повітряних суден малої авіації. Між тим, з метою розширення популярності експлуатації повітряних суден малої авіації, а особливо вертольотів, в першу чергу слід розвивати мережу вертолітних майданчиків. З поміж іншого, як невід'ємний елемент об'єктів наземного базування вертольотів, має також розвиватися мережа авіаційних технічних баз з ремонту та обслуговування вертольотів всіх типів що будуть експлуатуватися на теренах України. Стаття присвячена аспектам створення спеціалізованої мережі вертолітних майданчиків та авіаційних технічних баз з обслуговування типів вертольотів, що будуть експлуатуватися на території України, з урахуванням аналізу сучасного стану авіаційної інфраструктури та перспектив розвитку. Запропоновано в подальшому, при формуванні підходів до розбудови мережі вертолітних майданчиків та авіаційних технічних баз враховувати особливості регіонів України та спиратися на нормативно-правові норми не тільки державного рівня, а й міжнародного, що дозволить в подальшому використовувати мережу вертолітних майданчиків та авіаційних технічних баз на міжнародному рівні. Такий підхід має на меті не тільки підвищити надійність експлуатації авіаційної техніки, а й підвищити привабливість цього виду транспорту для вантажних та пасажирських перевезень.

Ключові слова: повітряне судно, вертоліт, авіаційне законодавство, міжнародна цивільна авіація, вертолітний майданчик, транспортна логістика.

Постановка проблеми. Завдання з організації заходів, що пов'язані із забезпеченням захисту, охороною та безпекою пасажирів та членів екіпажів, авіаційного персоналу, повітряних суден, об'єктів аеропортів та об'єктів радіонавігаційного забезпечення, не зважаючи на їх форми власності та підпорядкованості є на порядку денному світового співтовариства та перебувають на постійному контролі та удосконаленні міжнародними організаціями цивільної авіації. Сфера інтересів міжнародних організацій цивільної авіації є динамічною, в залежності від викликів які постають перед цивільною авіацією на світовому рівні [1].

У той же час вертолітна тематика та розвиток малої авіації не втрачає свою актуальність на світовому рівні. На противагу магістральним та регіональним літакам, авіаційна техніка малої авіації дешевша в обслуговуванні та не потребує особливих умов для експлуатації. А також, повітряні судна малої авіації на потребують великих обладнаних аеродромів, та великих ділянок відчуженої землі [2].

Такі особливості експлуатації повітряних суден малої авіації є однією з поміж інших причин постійного розширення сфери їх застосування як в різних галузях економіки, так і для виконання спеціальних завдань [1].

Між тим, слід зазначити, що все ж навіть вертольоти мають необхідність у вертодромах чи вертолітних майданчиках та інфраструктурі для їх обслуговування. Але на сьогоднішній день не в кожній області України є діюча інфраструктура для експлуатації цивільних повітряних суден, у тому числі малої авіації. Взагалі аеропорти були передбачені у кожній області України, але станом на лютий 2022 року серед них діючими залишилися лише 17 летовищ [3].

З поміж іншого слід зазначити, що крім аеропортів в Україні станом на литий 2022 року діяло 9 аеродромів цивільної авіації

У планах діючої влади були амбітні плани щодо відродження цивільного авіаційного транспорту шляхом впровадження аеропортів у кожному обласному центрі. Так, в планах мало було відбутися будівництво близько 15 аеропортів.

В умовах військового стану та за умов «закритого неба» в Україні на сьогодні не має можливості використовувати цивільний авіаційний транспорт. Між тим, слід зауважити, що частина авіаційної інфраструктури частково або повністю зруйнована. Внаслідок російської агресії було пошкоджено близько 33% інфраструктури по всій країні, і ця цифра збільшується щодня.

Поки триває війна та «небо закрите» для польотів цивільної авіації, неможливо говорити про відновлення цивільних авіаційних перевезень в Україні. Але є питання, над якими вже зараз слід розмірковувати. Під час війни авіаційний інфраструктурний сектор має ряд проблем, однак навіть зараз продовжуються пошуки та напрацювання альтернатив відомим логістичним шляхам як на світовому, державному так і на регіональному рівнях.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Не зважаючи на скрутні часи, військовий стан та руйнування об'єктів інфраструктури, є ряд доробок щодо перспективного розвитку транспортної системи в Україні. Одним з пріоритетних напрямків розвитку транспортної системи в Україні є розвиток малої авіації. Враховуючи унікальні можливості вертикального зльоту та посадки, а також можливості посадки на обмежені за розмірами площадки вертольоти в останній час набувають все більше значення в цивільній авіації, у широкому спектрі застосування [3–13].

У практиці вертолітних перевезень, склалась стійка тенденція до входження цього виду авіаційного транспорту до так званої ділової авіації, яка має свої особливості експлуатації в умовах мегаполісів. З поміж іншого, парк вертолітного транспорту на теренах України потрубує подальшого розвитку, оскільки об'єми вертолітних як пасажирських так і вантажних перевезень, у довоєнній країні постійно збільшувалося. Однак суттєвими недоліками вертолітного транспорту залишається висока вартість проїзду, мала провізна здатність (до 500–600 пас/год), утворенням значного шуму, постійний технічний моніторинг стану вертольоту та залежністю від погодних умов [14–16].

Метою статті є аналіз підходів до синтезу підходів розбудови застосування повітряних суден малої авіації, у тому числі вертольотів в регіональному аспекту на теренах України.

Виклад основного матеріалу дослідження. Як показує світовий досвід експлуатації різних типів вертольотів, враховуючи особливості їх маневровості є можливість їх використання в умовах забудови населених пунктів та промислових зон. Між тим, відповідники до статистики Київської асоціації аеронавтики на сьогодні в Україні експлуатуються лише кілька сотень різних типів вертольотів. Такий показник є занадто малим в порівнянні з країнами ЄС, де загальна кількість вертольотів становить близько 300 тис., з США – до 600 тис. вертольотів, а у м. Нью-Йорк експлуатуються понад 300 вертолітних майданчиків.

У той же час, авіаційна інфраструктура на теренах України налічує невелику кількість вертолітних майданчиків, що експлуатуються, а саме у Києві лише декілька вертолітних майданчиків – на даху будинку «Центра Серця» та вертодром «Дніпро-1». Такий стан справ вказує на актуальність обраного напряму дослідження в умовах України. Однак, потенціал маневрності вертольотів не можна використати у повній мірі без розгалуженої мережі авіаційної спеціалізованої інфраструктури, у тому числі вертолітних майданчиків та вертодромів. Між тим, в Україні на шляху розвитку малої авіації постає ряд перепон, до яких нормативів для врахування в повній мірі всіх факторів, котрі впливають на роботу вертолітного майданчика чи вертодрому під час експлуатації [1].

З поміж іншого, до складу авіаційної транспортної системи входять: різні типи повітряних суден, комплекси наземних засобів із підготовки та забезпечення польотів, особовий льотно-технічний склад, котрий виконує завдання щодо забезпечення надійної, безпечної та ефективної льотної та технічної експлуатації з подальшим ремонтним обслуговуванням повітряних суден та наземні засоби і системи управління процесами експлуатації. До авіаційної транспортної системи поставлені вимоги щодо забезпечення підвищеної безпеки, регулярності польотів та ефективної з точки зору комерційної складової, експлуатації льотної авіаційної техніки.

Особливе місце в авіаційних транспортних системах має технічна експлуатація яка має у своєму складі об'єкти і засоби технічної експлуатації, льотної та інженерно-технічного складу, системи управління функціонування технічної експлуатації, котрі взаємодіють з метою підтримки та відновлення функціональності, працездатності та забезпечення льотної придатності повітряних суден.

Особливо важливим елементом системи технічної експлуатації повітряних суден є система технічного обслуговування і ремонту, яка представлена сукупністю взаємодіючих об'єктів і засобів технічного обслуговування і ремонту, та відповідно кваліфікованого та сертифікованого інженерно-технічного складу.

Слід зазначити, що будь-яка авіаційна техніка, на етапі проєктування отримує певні функціональні та цільові можливості для виконання тих чи інших завдань, ефективно виконання яких на сьогоднішній день можливе з використанням сучасних систем авіоніки. Екіпаж повітря-

ного судна тісно контактує в процесі виконання завдань зі службою керування повітряним рухом та використовує існуючі можливості сучасних навігаційно-пілотажних комплексів. З метою підтримання високого рівня обслуговування пасажирів на борту повітряних суден, бортпровідники використовують наявні функціональні можливості бортової техніки та комунікацій. Між тим, всі ці системи мають постійно перевірятися на працездатність та ефективність функціонування, а за необхідності проводиться заміна обладнання яке частково чи повністю вийшло з ладу.

Також, не менш важливим є врахування того, що під час експлуатації такі складові повітряного судна, як планер, авіаційні двигуни, їхні системи та агрегати перебувають під впливом великої кількості факторів, котрі мають суттєвий вплив на зниження надійності. Таким чином, режими функціонування як всього повітряного судна, так і окремих його систем, вібрації, перепади температури, акустичні навантаження, кліматичні умови, кваліфікаційні навички льотної та інженерно-технічного складу тощо мають безпосередній вплив на надійність авіаційної техніки та безпеку її експлуатації. Таким чином, у багатофакторному середовищі взаємодії з навколишнім середовищем, у будь-який момент часу може статися перехід експлуатованого авіаційного об'єкта з працездатного стану в стан відмови.

Із аналізу попередньої інформації стає очевидним, що працездатний авіаційний об'єкт, на відміну від справного, має задовольняти лише формальним вимогам відповідної до його типу нормативно-технічної документації, котрі мають забезпечити його експлуатацію за визначеним типом під час проєктування призначенням. Тож, працездатний об'єкт має можливість мати статус несправного, якщо він не буде задовольняти другорядні вимоги, котрі безпосередньо не пов'язані із його функціональністю.

Таким чином, загальний масив всіх існуючих етапів функціонування авіаційних об'єктів, таких як підготовка до використання завдання, використання авіаційного об'єкту за призначенням, виконання різнопланового технічного обслуговування й ремонту, зберігання, транспортування, дії щодо управління льотним та інженерно-технічним складом у загальному вигляді характеризується поняттям експлуатація авіаційної техніки [14].

Також до елементів експлуатації авіаційної техніки відноситься не тільки льотна експлуатація повітряних суден, а й технічна експлуатація та ремонт на авіаційних заводах.

З поміж іншого, технічна експлуатація є також широким поняттям, котре складається з таких елементів, як технічне обслуговування, авіатехніки, організаційне забезпечення технічного обслуговування; науково-дослідні роботи з проблем технічної експлуатації; розробка і проведення заходів з підвищення ефективності технічної експлуатації та інших.

Між тим, відповідно до Авіаційних правил України до льотної експлуатації допускаються лише справні повітряні судна, які відповідають технічним умовам і пройшли перевірку та підготовку [10].

У свою чергу, справними вважаються повітряні судна, котрі відповідають виконанню таких вимог:

- планер, двигуни та їхнє обладнання мають залишок ресурсу і терміну служби, мають повну укомплектованість відповідно до технічних умов за типом;

- на повітряному судні завершено виконання всіх робіт в рамках Регламенту технічного обслуговування;

- на повітряному судні усунені всі несправності, які були зафіксовані у бортовому журналі відповідного повітряного судна, котрі були виявлені у процесі підготовки до польоту;

- оформлена у відповідності до норм експлуатаційна документація.

В окремих випадках, за певних об'єктивних умов повітряне судно можна визнати таким що готове до польоту зважаючи на деякі несправності в його системах та відмови, котрі впливають на рівень безпеки польоту. В залежності від типу повітряного судна, регламентовано перелік допустимих несправностей які не впливають на рівень безпеки польоту при вильоті з небазового летовища.

З поміж іншого, є актуальним вирішення таких задач у авіаційній галузі, котрі затверджені на рівні Міжнародної організації цивільної авіації ICAO, а саме забезпечення безпеки польотів цивільної авіації, підвищення ефективності глобальної системи цивільної авіації, підвищення та синтез глобальної авіаційної безпеки та оптимізація формальних процедур, керований економічний розвиток галузі. Вирішення зазначених задач, що стоять на світовому рівні, покликані забезпечити глобальні авіатранспортні мережі, котрі дотичні та спонукають соціальний та економічний розвиток, враховують потреби світового бізнесу, пасажирів та прогнозоване розширення та оптимізацію авіаційної галузі у світовому форматі [2].

У той же час кагорта урядових та неурядових міжнародних організацій в рамках своїх завдань та мети комунікують з ICAO, шляхом впровадження на регіональному рівні її політику та стандарти, що стосуються діяльності міжнародної цивільної авіації. Вказані організації проводять консультування з тих питань, котрі виникають в процесі функціонування міжнародної цивільної авіації у зв'язку з особливостями відповідного регіону [2–10].

Тож, ICAO приймає активну участь у підтримці авіаційного сполучення як особливо важливого стратегічного елементу розвитку інтегрованої транспортної інфраструктури, таким чином підвищує мобільність пасажирів та підприємств шляхом залучення існуючих видів транспортних систем та комплексів. Такий підхід може бути реалізовано за умови виконання міжнародних договорів у цивільній авіації та шляхом механізму втілення політики та стандартів ICAO [2–10].

З поміж іншого, ще у 2021 році Україна та Європейський Союз задекларували Угоду про Спільний авіаційний простір, основною метою якого було створення спільного авіаційного простору, який ґрунтується на впровадженні в Україні норм і стандартів ЄС в авіаційній галузі та націлена на поліпшення якості обслуговування пасажирів [2–10].

Між тим, проведений аналіз проблеми визначення тренду змін показників надійності вертольотів показав, ряд дій необхідних для визначення об'єктивної оцінки [11]:

- виконувати регулярний моніторинг безпеки польотів та виявляти чинники які спричиняють виникнення окремих систем та вузлів повітряних суден;

- затвердити послідовність вибору та періодичність погодження діапазонів граничних значень встановлених показників ефективності забезпечення безпеки відповідних типів авіаційної та їх граничні рівні.

Впровадження зазначеного підходу щодо визначення факторності та типовості мінливості показників надійності визначених типів повітряних суден має на меті дати можливість розробляти найбільш точні прогнози щодо рівня надійності відповідних типів повітряних суден та встановлювати цільові показники, котрі потребуватимуть покращення та оптимізації з метою вдосконалення відповідної авіаційної системи [12–14].

Таким чином, за результатами досліджень у даній роботі слід наголосити на необхідності створення сучасної інфраструктури для обслуговування та безпечної експлуатації та підтримки

льтної придатності повітряних суден малої авіації. Між тим, з метою розширення популярності експлуатації повітряних суден малої авіації, а особливо вертольотів, в першу чергу слід розвивати мережу вертолітних майданчиків. З поміж іншого, як невід'ємний елемент об'єктів наземного базування вертольотів, має також розвиватися мережа авіаційних технічних баз з ремонту та обслуговування вертольотів всіх типів що будуть експлуатуватися на теренах України.

Висновки. 1. Враховуючи актуальність та необхідність розвитку малої авіації України, проведено аналіз сучасного стану авіаційної інфраструктури та перспектив розвитку, що вказує на необхідність створення спеціалізованої мережі вер-

толітних майданчиків та авіаційних технічних баз з обслуговування типів вертольотів, що будуть експлуатуватися на території України.

2. Запропоновано в подальшому, при формуванні підходів до розбудови мережі вертолітних майданчиків та авіаційних технічних баз враховувати особливості регіонів України та спиратися на нормативно-правові норми не тільки державного рівня, а й міжнародного, що дозволить в подальшому використовувати мережу вертолітних майданчиків та авіаційних технічних баз на міжнародному рівні. Такий підхід має на меті не тільки підвищити надійність експлуатації авіаційної техніки, а й підвищити привабливість цього виду транспорту для вантажних та пасажирських перевезень.

Список літератури:

1. Григоров О.М. Міжнародно-правові засади регулювання відносин у сфері цивільної авіації: становлення та розвиток: Монографія. Одеса: Фенікс. 2020. С.280–281.
2. Офіційний сайт International Civil Aviation Organization [Електронний ресурс]. Режим доступу: <http://www.icao.int/Pages/default.aspx>.
3. ICAO Strategic Objectives [Електронний ресурс]. Режим доступу: <http://www.icao.int/about-icao/Pages/Strategic-Objectives>.
4. Офіційний сайт International Air Transport Association [Електронний ресурс]. Режим доступу: <http://www.iata.org>.
5. Growth and Development// Офіційний сайт International Air Transport Association [Електронний ресурс]. Режим доступу: http://www.iata.org/about/Pages/history_3.aspx.
6. ECAC – European Civil Aviation Conference [Електронний ресурс]. Режим доступу: http://www.icao.int/secretariat/PostalHistory/ecac_european_civil_aviation_conference.htm.
7. AFCAC Objectives [Електронний ресурс]. Режим доступу: http://www.afcac.org/en/index.php?option=com_content&view=article&id=129&Itemid=211.
8. Reseña Histórica del COCESNA [Електронний ресурс]. Режим доступу: <http://www.cocesna.org>.
9. Повітряний кодекс України URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/3393-17#Text> (дата звернення: 27.11.2021)
10. Чернявський В.М. Застосування параметричних методів для оцінки рівня надійності авіаційної техніки з низькою інтенсивністю експлуатації // Труди Харківського університету Повітряних Сил ім. І.Кожедуба. Харків: ХУПС, 2012. № 3. С. 59-63.
11. Експлуатаційна надійність авіаційної техніки і безпека польотів за 2019 рік. Випуск. / О.Л. Бурсала, В.Т. Бояров, В.М. Голуб, М.М. Жданюк. Чернігів: ДНДІ ВС ОБТ, 2018. 100 стор.
12. Голуб В.М. Аналіз методичних підходів до оцінювання надійності авіаційної техніки державної авіації за експлуатаційними даними / В.М. Голуб, А.Г. Павленко, О.М. Чередніков, В.М. Чуприна // Збірник наукових праць Державного науково-дослідного інституту випробувань і сертифікації озброєння та військової техніки. Чернігів: Брагинець О.В., 2019. Вип. № 2. С. 53-61.
13. VijayAgalar. Modern Heliport Design. A design guide complies to international standards for every engineer. / Vijay Agalar. Lambert Academic Publishing. 2012. 72 p.
14. Airport engineering: planning, design and development of 21st century airports / Norman J. Ashford, SalehMumayiz, Paul H. Wright. 4th edition. 2011. 769 p.

Boiko S.M., Kotov O.B., Ishchenko S.O., Gladkyu Yu.M., Sharypenko Yu.V., Gvozdik S.D. FEATURES OF THE DEVELOPMENT OF SMALL AVIATION OPERATION WITHIN THE FRAMEWORK OF REGIONAL TRANSPORTATION

The article is devoted to the generalization of approaches to the development of the use of small aviation aircraft, including helicopters, in a regional section on the territory of Ukraine. The article defines the main requirements for aircraft that are allowed to fly. Attention is focused on the fact that governmental and non-governmental international organizations within their competence interact with ISAO, bringing its policy and standards regarding civil aviation activities to the regions. Accordingly, these organizations provide assistance

in those issues that arise in the process of international civil aviation due to the peculiarities of one or another region. In the article, taking into account all the mentioned aspects, conditions and factors, an approach to determining the trend of changing reliability indicators of helicopters of various types is proposed, which will make it possible to develop forecasts of the level of reliability of helicopters. aircraft and establish targets to be maintained or improved in order to improve the relevant aviation system. At the same time, the article, based on research results, proves the necessity of creating a modern infrastructure for technical maintenance and safe operation and maintaining the airworthiness of small aircraft. At the same time, in order to expand the popularity of the use of small aircraft, and especially helicopters, the network of helipads should be developed first of all. Among other things, as an integral element of the helicopter ground base, a network of aviation-technical bases for the repair and maintenance of helicopters of all types that will be operated on the territory of Ukraine should also be developed. The article is devoted to the aspects of creating a specialized network of helipads and aviation-technical bases for servicing the types of helicopters that will be operated on the territory of Ukraine, taking into account the analysis of the current state of aviation infrastructure and development prospects. It is suggested that in the future, when forming approaches to the development of the network of helipads and aviation-technical bases, take into account the peculiarities of the regions of Ukraine and rely on regulatory and legal norms not only at the state level, but also at the international level, which will allow further use of the network of helipads and aviation-technical bases at the international level. Such an approach is aimed not only at increasing the reliability of aviation equipment, but also at increasing the attractiveness of this type of transport for transporting cargo and passengers.

Key words: airplane, helicopter, aviation legislation, international civil aviation, helipad, transport logistics.

УДК 629.7.03

DOI <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2023.5/04>

Довбиш І.О.

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

Муравйов О.В.

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

Галаган Р.М.

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

Богдан Г.А.

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

Момот А.С.

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

СИЛОВІ УСТАНОВКИ ТА ДЖЕРЕЛА ЕНЕРГІЇ СУЧАСНИХ БПЛА

Безпілотні літальні апарати стали невід’ємною частиною життя людини: їх використовують у промисловості, для рятувальних операцій, у військовій техніці та з розважальною метою. Серед сучасних моделей є як керовані людиною, так і частково або повністю автоматизовані. Сьогодні з них створюють рої і постійно підвищують можливості корисного навантаження, що дозволяє значно розширити перелік задач, які вирішується за допомогою дронів. Розробка та вдосконалення технологій БПЛА належать сьогодні до одного з найактуальніших світових напрямків розвитку техніки, що обумовлено майже щоденною появою нових завдань, вирішення яких покладається на дрон. Єдиною проблемою, яка існує ще з початку історії конструювання БПЛА, є питання збільшення дальності та часу польоту дрона.

У даній роботі проаналізовані варіанти сучасної реалізації силових установок, що забезпечують політ БПЛА. Розглянуті двигуни внутрішнього згорання, електродвигуни та гібридні системи, що створюються шляхом поєднання цих двох типів двигунів. Коротко описаний принцип їх роботи, виявлено основні переваги, недоліки, перспективи та можливі сфери їх застосування. Обґрунтовано вибір конкретного типу силової установки БПЛА, що є необхідним для реалізації певних можливостей дрона, таких як: підйом важкого вантажу, висока тривалість польоту, вертикальний зліт, зависання у повітрі та рух з невеликою швидкістю.

Проаналізовано джерела енергії, що стали найбільш поширеними для забезпечення роботи електродвигунів. Особливу увагу приділено сонячним панелям та водневим паливним елементам, що суттєво збільшують тривалість польоту та наразі є найекологічнішими. На сьогоднішній день рекордсменом по тривалості неперервного польоту є БПЛА, в якості джерела енергії в якому використовуються сонячні батареї, виготовлені з аморфного кремнію.

Перспективними напрямками досліджень сьогодення є модифікація силових установок та джерел енергії БПЛА. Вважатися вирішеною розглянута проблема буде у результаті створення дрона з можливістю піднімати різноманітні вантажі при забезпеченні «нескінченно довгого» польоту, посадка при якому здійснюється виключно з метою ремонту та за бажанням людини.

Ключові слова: *безпілотний літальний апарат, гібридні БПЛА, силова установка, джерела енергії, двигун внутрішнього згорання, електродвигун.*

Постановка проблеми. Сучасне життя важко уявити без безпілотних літальних апаратів (БПЛА), які використовують у таких сферах життєдіяльності

людини, як медіа, геодезія, сільське господарство, нафтогазова промисловість, електроенергетика та ін. У кожній галузі одними з найважливіших харак-

теристик для БпЛА є дальність та час польоту. Питання збільшення цих можливостей виникає перед розробниками з моменту створення найпершого дрона на початку 19 ст. Важливими є також мінімізація витрат палива та реалізація високого рівня вантажопідйомності [1, с. 203–204]. Чи не єдиним способом вирішення даної задачі є модифікація двигунів та джерел живлення, з яких надходить енергія для польоту БпЛА.

Актуальним також є пошук альтернативних акумуляторам та паливу джерел енергії. Подібні дослідження викликані питанням забезпечення «нескінченно довгого» польоту БпЛА, при якому посадка буде здійснюватися для заміни запчастин та проведення ремонту [2, с. 159–161].

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Упродовж історії будівництва безпілотних літальних апаратів найбільш поширеними стали двигуни внутрішнього згорання та електродвигуни. Кожен з них має свої особливості, переваги і недоліки. Вибір типу двигуна відбувається на основі задач та вимог до розроблюваного БпЛА.

Інтерес до досліджень силових установок та пошуку джерел енергії для БпЛА підтверджується великою кількістю наукових робіт. Основною темою на сьогодні є комбінування декількох джерел енергії в одному БпЛА. Найбільш поширеними варіантами поєднання є:

- сонячні батареї та акумулятори [3, с. 35–38];
- водневе паливо та сонячні батареї [4, с. 4–9];
- двигун внутрішнього згорання та електродвигуни.

Кожен з вказаних варіантів дозволяє певним чином покращити характеристики дрона. Серед переваг є збільшення часу польоту, вихідної потужності, вантажопідйомності БпЛА.

Окремої уваги заслуговує водневе паливо, яке стало альтернативою традиційним акумуляторам і вже використовується в якості ефективного джерела енергії БпЛА [4, с. 4–9; 5]. У свою чергу сонячні батареї наразі є єдиним варіантом забезпечення польоту, в процесі якого можливе відновлення запасів енергії.

Варто зазначити, що на сьогоднішній день проводяться дослідження не лише з метою пошуку нових технологій, механізмів і систем, а й для покращення характеристик вже існуючих силових установок. Наприклад, у роботі [6, с. 131–133] представлена концепція підвищення потужності електродвигуна за рахунок збільшення радіусу ротора гвинта.

Метою роботи є аналіз та порівняння можливостей силових установок, що застосовуються

в сучасних БпЛА, виявлення перспективних напрямків розвитку розглянутих систем і дослідження залежності обраного механізму та джерела енергії від цільових функцій дрона.

Двигуни внутрішнього згорання. Найперші створені БпЛА здебільшого будувалися за прикладом відповідних літаків, а отже, у своїй конструкції мали двигуни внутрішнього згорання (ДВЗ). Наприклад, під час Другої світової війни був побудований БпЛА DH.82 Queen Bee, який часто називають «матір'ю дронів» [7]. Це був безпілотний радіокерований літак-мішень, створений на базі британського навчального літака, який було розроблено на початку 1930-х років. Обидва із зазначених літальних апаратів використовували 4-х циліндровий двигун внутрішнього згорання.

Сьогодні ДВЗ зустрічаються рідше, проте їх все ще використовують для БпЛА, які розраховані на підйом важкого вантажу. Основними галузями застосування таких дронів стали аграрна та військова промисловість, рятувальні операції. Обумовлено це головним недоліком при використанні ДВЗ – великою вагою та габаритами силової установки. Також для функціонування механізму необхідна наявність на борту БпЛА наступних систем: подачі пального, запуску та охолодження.

ДВЗ використовуються у БпЛА літакового та гелікоптерного типу. Щодо БпЛА з фіксованим крилом, при використанні лише ДВЗ, вони потребують злітну та посадкову смуги. Для реалізації вертикального зльоту та посадки додатково встановлюються електродвигуни. Прикладом такої реалізації є БпЛА українського виробництва PD-2 (рис. 1) компанії Ukrspesystems. Так як основною силовою установкою є ДВЗ, корисне навантаження цього дрона може сягати 19 кг при максимальній злітній вазі 55 кг [8].



Рис. 1. БпЛА PD-2 компанії Ukrspesystems

У мультикоптерах обертовий момент має передаватися на кожен гвинт від одного двигуна. Це значно ускладнює задачу повороту дрона, для виконання якого необхідно забезпечити різну

швидкість обертання гвинтів. Використання різноманітних передач збільшує вагу та зменшує швидкість реагування при зміні напрямку руху. Тому ДВЗ у мультикоптерах використовують здебільшого в складі гібридної силової установки, що буде розглянута далі.

Суттєвою перевагою ДВЗ перед електродвигунами є швидка дозаправка. У якості палива використовують здебільшого бензин з октановим числом не менше 85. Він є досить поширеним на ринку, що не викликає додаткових проблем із пошуком палива.

Серед недоліків ДВЗ варто окремо зазначити затримку між наданням команди та фактичною зміною швидкості або напрямку руху БПЛА, вибухонебезпечність, відносно високу ціну палива та значний шум при роботі двигуна. Використання механізму у військових цілях та для проведення розвідувальних операцій ускладнено нагріванням двигуна та високою температурою вихідних газів, що робить БПЛА дуже помітним в інфрачервоному діапазоні спектра. З точки зору екологічності ДВЗ також сильно поступаються електродвигунам.

Для забезпечення вищого значення вихідної потужності та при необхідності досягнення високих швидкостей у БПЛА встановлюють ДВЗ з турбонаддувом чи турбореактивні двигуни.

Електродвигуни. Електродвигуни наразі є найбільш поширеними джерелами енергії БПЛА. Вони дедалі більше замінюють ДВЗ та поступово отримують певні модифікації, що стосуються як покращення характеристик самого двигуна, так і джерела живлення.

У сучасних БПЛА використовують як колекторні (рис. 2, а), так і безколекторні (рис. 2, б) електродвигуни. Основна відмінність між ними полягає у наявності щіток та колектора. Колекторні електродвигуни мають наступну структуру: статор з постійним магнітом, ротор з обмотками та колектор. За допомогою щіток передається струм від пластин колектора до обмотки ротора, що змінює напрям струму і змушує двигун працювати. При цьому відбувається постійне тертя між щітками та пластинами, на подолання якого необхідно витратити певну енергію. Також даний механізм є досить шумним. Для збільшення обертового моменту такого двигуна інколи використовують редуктори, що додатково ускладнює конструкцію та процедуру ремонту БПЛА.

Безколекторний двигун, окрім того, що не має зазначених недоліків колекторного, має меншу вагу, більший коефіцієнт корисної дії та обертовий момент. Він складається зі статора з обмот-

ками, ротора з постійним магнітом та електронного регулятора, за рахунок якого змінюється подача струму на обмотки та контролюється швидкість обертів двигуна. Використовують трьохкратну кількість обмоток (здебільшого 3, 6, 9 або 12). Розглянемо принцип роботи такого двигуна на прикладі трьох наявних у ньому обмоток. Струм подається до кожної обмотки по черзі, що робить її електромагнітом і змушує обертатися ротор. Безколекторний двигун також називають трьохфазним. Дана конструкція не має колектора та щіток, що спрощує обслуговування та збільшує час експлуатації. Для захисту від вологи та пилу, які можуть пошкодити даний механізм, використовується корпус закритого типу.

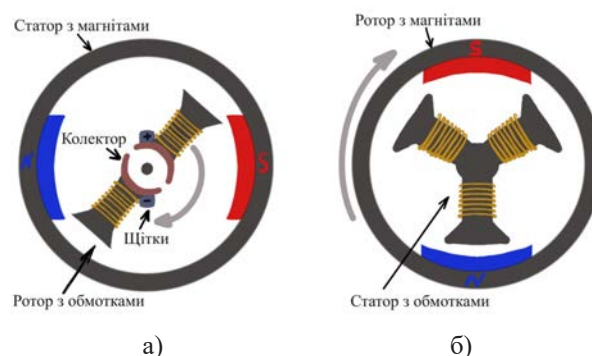


Рис. 2. Схеми електродвигунів: а) колекторний електродвигун, б) безколекторний електродвигун

Широке використання колекторних двигунів сьогодні обумовлене їх меншою вартістю у порівнянні з безколекторними. Найдорожчим компонентом в останніх є електронний регулятор.

Електродвигуни є достатньо простими у встановленні та експлуатації. Їх можна зустріти у всіх видах сучасних БПЛА: гелікоптерного та літакового типу, мультикоптерах. В останніх для кожного гвинта наявний окремий електродвигун. Швидкість обертання ротора двигуна, а отже, й швидкість та напрям польоту регулюється за допомогою коригування напруги, поданої на кожен двигун контролером польоту.

Здебільшого електродвигуни працюють від акумуляторів, що є найпростішим та найдешевшим варіантом живлення. Найбільш вживаними на сьогодні є літій-полімерні (Li-Pol) та літій-іонні (Li-Ion) акумуляторні батареї. Також активно впроваджується використання літій-залізо-фосфатної (Li-Fe-Po) технології, що допоможе знизити вагу акумуляторів, майже вдвічі продовжити час польоту та збільшить діапазон температур, при яких БПЛА зможе виконувати завдання (від -20 до +40°C). Також вони є безпечнішими за інші типи батарей.

Говорячи про акумулятори в якості джерел живлення, варто згадати низку їх недоліків:

- робота акумуляторів залежить від температури: за низьких температур їх продуктивність значно знижується. Отже, в залежності від погодних умов БПЛА зможе пролетіти різну відстань, що неможливо передбачити;
- з часом ємність акумуляторів зменшується. У середньому рекомендується змінювати акумулятор БПЛА кожні 150-200 циклів перезарядок;
- для перезарядки акумулятора потрібна досить велика кількість часу, а отже БПЛА неможливо використовувати одразу для вирішення наступної задачі.

Наведені вище недоліки акумуляторів та необхідність збільшення часу польоту спонукали до пошуку альтернативних джерел енергії. Гідною заміною стали водневі паливні елементи (рис. 3), що отримують енергію з хімічних реакцій. Сам паливний елемент складається з аноду, катоду та мембрани з електроліту. Електричний струм створюється за рахунок електронів, що відокремлюються від атомів водню при проходженні через анод. В основі роботи паливного елемента покладений процес горіння водню, під час якого відбувається відновлення атомів кисню та окиснення атомів гідрогену.

Водневі паливні елементи можуть працювати значно довше за акумулятори, а отже забезпечують більшу дальність та час польоту БПЛА. Після закінчення протікання хімічної реакції в елементі його можна швидко замінити на новий. Також використання такого джерела енергії є досить екологічним, адже єдиною вихідною речовиною є вода.

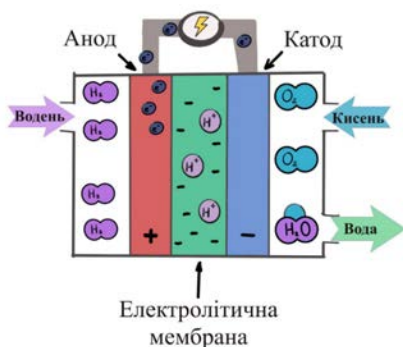


Рис. 3. Схема водневого паливного елемента

Сьогодні часто зустрічаються БПЛА, що працюють на сонячних батареях. Їх використання спричинене необхідністю забезпечення польоту, час якого буде обмеженим лише потребою у ремонті БПЛА або бажанням людини. Напряга, яку може надавати сонячна батарея, різняться в залежності

від погоди та часу доби. Тому такі БПЛА мають накопичувати енергію в акумуляторах.

Саме завдяки джерелу енергії – сонячному світлу політ може здійснюватися впродовж років, не повертаючись на землю та без негативного впливу на довкілля. Це стало великим проривом у технології БПЛА. Розглядається, що такі дрони зможуть у перспективі замінити штучні супутники, ведучи постійне спостереження за поверхнею Землі, та, у якості ретрансляторів, забезпечити зв'язок у важкодоступних та віддалених областях. Прикладом такого дрона є Zephyr (рис. 4), розроблений компанією Airbus. Його розвиток бере початок у 2001 році. У 2022 цей БПЛА зміг протриматися у повітрі впродовж 64 днів. При його будівництві використані високо енергетичні сонячні батареї з аморфного кремнію, товщина яких не перевищує товщину аркуша паперу. Навіть найсучасніші технології виготовлення фотоелементів не можуть забезпечити високу потужність, тому у даному випадку особливо важливо максимально зменшити вагу та приділити велику увагу структурі БПЛА. Не зважаючи на свої вражаючі розміри (розмах крил сягає 25 метрів), Zephyr важить всього 75 кг [9]. Даний БПЛА літає на висоті вище 21 км, тому хмари не є проблемою для отримання сонячної енергії.



Рис. 4. БПЛА Zephyr компанії Airbus

Гібридні силові установки. Гібридними називають БПЛА, що використовують одночасно два типи розглянутих вище двигунів. Такі дрони наразі дуже поширені в аграрній промисловості. Одними з цільових задач БПЛА є розпиркання добрив та спостереження за рослинами, для чого необхідна можливість зависати у повітрі та рухатися з невеликою швидкістю. Таким функціоналом володіють мультироторні дрони. Їх робота забезпечується шляхом встановлення окремого електродвигуна для кожного гвинта. Також важливим для розглянутої галузі є забезпечення високого рівня вантажопідйомності, що можливо отримати за рахунок використання ДВЗ.

Якщо необхідним є отримання потужності від ДВЗ, а управління рухом відбувається за рахунок електродвигунів, така система реалізується в гібридних БпЛА, де поєднуються переваги обох типів двигунів. Також під час роботи ДВЗ паралельно відбувається зарядка акумулятора. Це дозволяє подовжити час польоту після вичерпання палива та робить БпЛА надійнішим: у разі виходу з ладу ДВЗ можливим буде здійснення безпечної посадки.

Серед переваг гібридних установок, окрім значної тягової сили, варто виокремити незалежність від злітних та посадкових смуг, мобільність управління.

Проте установка даного типу не є ефективною для БпЛА гелікоптерного або літакового типу масою вище 50 кг. У цьому випадку краще використовувати ДВЗ, не втрачаючи потужність на передачу енергії до електродвигунів.

Висновки. У сучасному світі обраний тип силової установки відповідає вимогам, що висуваються до конкретного БпЛА. Для підйому важких вантажів використовують двигуни внутрішнього

згорання, для ведення спостереження – електродвигуни. Синтез цих систем, тобто гібридні силові установки, використовують у ситуаціях, де необхідною є наявність переваг обох типів двигунів.

Різняться й цілі використання різних джерел енергії для БпЛА, політ яких здійснюється за рахунок електродвигунів. Акумулятори застосовують у найменших БпЛА та для виконання найпростіших задач, що обумовлено відносно низькою їх вартістю. Також акумулятори використовують для накопичення залишкової енергії, отриманої з фотоелементів або гібридної силової установки.

Саме завдяки впровадженню сонячних панелей реальною стала ідея забезпечення «нескінченно довгого» польоту БпЛА. У свою чергу водневі паливні елементи активно замінюють акумулятори, забезпечуючи більший час польоту.

Перспективними напрямками розвитку технологій БпЛА на сьогодні є удосконалення силових установок та джерел живлення, пошук альтернативних варіантів та застосування відновлюваних джерел енергії.

Список літератури:

1. 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.
2. Довбиш І.О., Муравйов О.В. Залежність архітектури рою від рівня автономності БпЛА. *XVI Всеукраїнська науково-практична конференція студентів, аспірантів та молодих вчених «Погляд у майбутнє приладобудування»*, м. Київ, збірник праць конференції. 2023. С. 158–161.
3. Nguyen C.V., Quyen T.V., Le A.M., Truong L.H., Nguyen M.T. Advanced Hybrid Energy Harvesting Systems for Unmanned Aerial Vehicles (UAVs). *Advances in Science, Technology and Engineering Systems Journal.* 2020. Vol. 5, No. 1. 34–39.
4. Skarka W., Peciak M. Designing Hybrid Energy Source System for Long Endurance Electric UAV. *Transdisciplinary Engineering for Complex Socio-technical Systems.* 2019. pp. 3–11.
5. Pourrahmani H., Bernier C.M.I., Van herle J. The Application of Fuel-Cell and Battery Technologies in Unmanned Aerial Vehicles (UAVs): A Dynamic Study. *Batteries.* 2022. 8. 73.
6. Журиленко Б.Є., Ніколаєв К.І., Ніколаєва Н.К. Зміна конструкції електродвигунів транспортних систем з метою економії енергоресурсів автономних джерел живлення. *Наукові технології.* 2018. № 1 (37). С. 130–135.
7. Vintage wings of Canada, The mother of all drones. URL: <https://www.vintagewings.ca/stories/mother-of-all-drones> (дата звернення: 15.09.2023).
8. Ukspecsystems, PD-2 unmanned aerial system. URL: <https://ukspecsystems.com/drones/pd-2-uas> (дата звернення: 15.09.2023).
9. BBC, Zephyr breaks own record for longest unmanned flight. URL: <https://www.bbc.com/news/technology-62123819> (дата звернення: 15.09.2023).

Dovbysh I.O., Muraviov O.V., Galagan R.M., Bohdan H.A., Momot A.S. POWER SYSTEMS AND ENERGY SOURCES OF MODERN UAVS

Unmanned aerial vehicles have become an integral part of human life. They are used in industry, rescue operations, military equipment and for entertainment purposes. Among modern models, there are both human-controlled and partially or fully automated ones. Today, swarms are created from them and the capabilities of useful payloads are constantly being increased, which significantly expands the list of tasks solved by drones. The development and improvement of UAVs technologies are currently one of the most relevant global trends in technical science and engineering, due to the almost daily emergence of new tasks, the solution of which is

entrusted to the drone. The only problem that has existed since the beginning of UAV construction history is the issue of increasing the drone's range and flight time.

In this paper, options for the modern implementation of power systems that ensure UAV flight are analyzed. Internal combustion engines, electric motors and hybrid systems, which are created by combining these two types of engines, have been considered. The principle of their operation is briefly described also as main advantages, disadvantages, prospects and possible areas of application. The choice of a specific type of UAV power system, which is necessary for the implementation of certain drone capabilities such as heavy lift, high flight duration, vertical take-off, hovering and slow speed motion is substantiated.

Sources of energy, that have become most common for powering electric motors, are analyzed. Special attention is paid to solar panels and hydrogen fuel cells, which significantly increase flight duration and are currently the most environmentally friendly. At present, the continuous flight duration record is held by a UAV that uses solar batteries made of amorphous silicon as an energy source.

Nowadays promising areas of research include the modification of power systems and energy sources for UAVs. The considered issue will be deemed solved as a result of creating a drone with the ability to lift various loads while providing an "infinitely long" flight, which lands solely for the purpose of repair and at the discretion of human.

Key words: *unmanned aerial vehicle, hybrid UAVs, power system, energy sources, internal combustion engine, electric motor.*

ПРИЛАДИ

УДК 535.232

DOI <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2023.5/05>

Романюк В.А.

Національна академія Національної гвардії України

Стародубцев С.О.

Національна академія Національної гвардії України

ДОСЛІДЖЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ЛАЗЕРНИХ МЕТОДІВ ВИЯВЛЕННЯ БЕЗПЛОТНИХ ЛІТАЛЬНИХ АПАРАТІВ

Стаття присвячена визначенню способів протидії малорозмірним літальним апаратам, у яких невелика ефективна відбивна поверхня. Сьогодні у світі стрімко розвивається розробка та випробування різних лазерних систем. Вже було проведено випробування лазерного озброєння на землі/воді/повітря/космосі. Випробування показують ефективність нових розробок, і лише існуючі технології обмежують вчених у розвитку лазерів. Над розвитком лазерних систем працюють приватні і державні організації різних країн, а щодо перспектив їх застосування – це лише питання часу. Це також стосується і проблеми щодо виявлення безпілотних літальних апаратів.

З'ясовано, що важко виявити такі об'єкти існуючими засобами протиповітряної оборони, особливо в темну пору доби, коли візуально їх неможливо ідентифікувати. Але це можливо зробити завдяки використанню лазерних засобів, які отримують інформацію про такі об'єкти методами, які визначають суттєву відмінність оптико-атмосферних характеристик збуреної літальним апаратом області простору відносно навколишнього повітря.

Радіолокаційні і лазерні системи працюють по відбитому від безпілотного апарату сигналу, а запропоновані засоби аналізують методами лазерного зондування розсіяне слідом літального апарату випромінювання. Взаємодія випромінювання із середовищем проявляється у формі таких фізичних явищ, як аерозольне й молекулярне розсіювання, резонансне поглинання, комбінаційне, резонансне види розсіювання, зміна вигляду прийнятого сигналу, доплерівське поглинання й збільшення або зменшення частоти випромінювання. У розсіяному в зворотному напрямку сигналу міститься інформація про характеристики області простору, в якому проводилося зондування.

Обробка результатів зондування дозволяє в поточному часі з високою ймовірністю визначити, є чи немає в області простору, де проводилося зондування, літальний апарат. Таким чином, у повітряному просторі, який досліджується, у певних межах будуть змінюватися концентрація часток й їхній просторовий розподіл відносно незбуреної частини повітряного простору, що слугуватиме інформаційною ознакою наявності повітряних об'єктів в даному об'ємі повітряного простору.

Ключові слова: лазерна зброя, методи зондування, лазерне випромінювання, параметри випромінювання.

Постановка проблеми. Масове застосування безпілотних літальних апаратів є характерною ознакою ведення бойових дій в сучасних війнах. Без цих невеликих пристроїв вже неможливо зараз уявити, що воювати можна по іншому: розвідка, нанесення бомбових ударів, дрони – камікадзе. Велика кількість, гнучка тактика застосування, вдень і в нічний час. Особливістю даного виду техніки є те, що їх важко виявити, особливо в темну пору доби завдяки значною відмінністю у порівнянні із іншими повітряними об'єктами: невеликі розміри і, відповідно мала ефективна відбивна поверхня.

Можливість виявлення подібних об'єктів лазерними засобами обумовлена істотною відмінністю параметрів досліджуваного об'єму простору від характеристик навколишнього повітря. Фіксація цих відмінностей здійснюється в процесі обробки результатів зондування досліджуваної області простору й полягає в порівнянні отриманих даних лазерних вимірів концентрації характерних компонентів з деяким граничним (фонним) їхнім значенням, характерним для звичайної атмосфери в даному місці. Такі виміри роблять шляхом посилки випромінювачем лазера короткого

світлового імпульсу в напрямку обраного об'єму простору й реєстрації приймальним пристроєм розсіяного у зворотному напрямку лазерного випромінювання. При цьому стробування по дальності роблять залежно від умов і завдань виявлення різних типів об'єктів [5, с. 7].

Аналіз останніх досліджень і публікацій.

Актуальні питання дослідження і розробки способів протидії малорозмірних, з малою відбивною поверхнею літальних апаратів викладено як в наукових працях вітчизняних (М.М. Биков, С.М. Тюрін, А.Г. Єрилкін, Д.В. Карлов та ін.) так і зарубіжних дослідників. За досвідом війни в Україні зарубіжні фахівці вважають, що тенденція зростання загрози малих безпілотних літальних систем буде лише посилюватись у найближчий час. І хоча ця проблема існувала і раніше, нині хід і логіка бойових дій ясно дає зрозуміти важливість ефективної протидії БПЛА [1, с. 1].

Для боротьби з ударною безпіотною авіацією застосовують різні методи протидії ударним БПЛА противника. Їх можна поділити на контактні і безконтактні.

При контактних методах боротьби застосовуються такі засоби як сітки, стрілецька зброя, тощо. При безконтактних – засоби радіоелектронної боротьби, лазери. До безконтактних методів боротьби з БПЛА також відноситься лазерна зброя, яка розробляється різними державами і компаніями світу [2, с. 16, 19].

Лазерні засоби виявлення подібних літальних апаратів використовують результати зондування повітряного простору в напрямку можливої атаки БПЛА і оцінюють відмінність параметрів досліджуваного об'єму простору від характеристик навколишнього повітря. При перевищенні концентрації певних речовин її граничного рівня для незбуреної атмосфери приймається рішення про наявність в даному напрямку літального апарату [3, с. 58; 4, с. 24].

Метою роботи є оцінка ефективності використання різних методів лазерного дистанційного зондування і вибір найбільш ефективних із них для застосування в лазерних системах виявлення повітряних об'єктів.

Виклад основного матеріалу. У найбільш загальному виді застосовується схема моностатичного зондування, що характерна для вирішення локаційних завдань.

Значні труднощі, що виникають при реалізації такої схеми, зв'язані зі специфічними особливостями вимірів лазерно-локаційного типу, основні з яких викликані високою невизначеністю стану

об'єкта дослідження, відсутністю апріорних відомостей про нього, більшим динамічним діапазоном зміни інтенсивності (до 160 дБ) сигналу зворотного розсіювання. В умовах впливу сильних світлових перешкод оптичні засоби виміру сигналів зворотного розсіювання повинні забезпечити вимір форми однократних імпульсних аналогових сигналів у струмовому режимі фотодетекторів, амплітудно-часових параметрів стохастичних імпульсних потоків у багатофотонному режимі і їхніх лічильно-часових характеристиках в однофотонному режимі.

Крім описаних труднощів варто враховувати статистичний характер розсіяного сигналу, обумовлений великою мінливістю в просторі й часі концентрації, розмірів, хімічного складу компонентів, що розсіюють, а також флуктуаціями їх динамічних й оптичних характеристик. Турбулентні флуктуації показника переломлення на атмосферній трасі призводять до перекручування вихідних параметрів лазерного пучка, що мають важливе значення для інтерпретації результатів лазерного дистанційного зондування, а також є причиною флуктуацій сигналу, які обмежують чутливість методу поглинання на протяжних локаційних трасах. Важливим аспектом функціонування лазерних систем є методи, що використовуються, реєстрації сигналів зворотного розсіювання. У вимірювальних системах, що використовують осцилографічний метод реєстрації, для одержання інтенсивності сигналу як функції часу, обробка візуальної інформації з екрана осцилографа здійснюється шляхом поділу площі, обмеженою повною огинаючою зареєстрованого сигналу, на усереднену площу одноелектронного імпульсу [6, с. 175]. Однак такий метод реєстрації не забезпечує необхідну точність й оперативність вимірів форми аналогового сигналу зворотного розсіювання і практично не дозволяє здійснити вимір в однофотонному або близькому до нього режимі.

Крім осцилографічних систем відомі одноканальні вимірювальні системи, що реалізують стробоскопічний метод виміру сигналу зворотного розсіювання. У них виміри здійснюють шляхом додаткового інтегрування сигналу в зоні строба за допомогою стробоінтеграторів. Однак дані сигнали також не забезпечують необхідну точність й оперативність вимірів, тому що на кожному циклі зондування вони вимірюють значення лише однієї точки вибірки сигналу розсіювання. При цьому для повного аналізу траси довжиною R із просторово-часовим дозволом R потрібно N_p реалізацій сигналу й відповідно циклів зондування, необхідне число яких визначається зі співвідношення [7, с. 231],

$$N_p = \frac{R}{\Delta R} = \frac{R \cdot C}{2 \cdot T_c}, \quad (1)$$

де T_c – тривалість строб-сигналу інтегратора.

Даний метод має низьку інформаційну продуктивність і його ефективність знижується при збільшенні необхідного просторово-часового дозволу й довжини траси, тому що при цьому зростає загальний час виміру t :

$$T = N_p t_n = \frac{R}{\Delta R} t_n, \quad (2)$$

де t_n – період проходження зондувальних імпульсів.

За результатами досліджень [8, с. 11] можливими методами багатопараметричного аналізу сигналів зворотного розсіювання є методи багатоканального аналогоцифрового кодування і однофотонний статистичний метод. Вони істотно підвищують оперативність і вірогідність вимірів. Однак розроблені багатоканальні вимірювальні системи не забезпечують виміру досить довгих реалізацій сигналу зворотного розсіювання за однократний моноімпульсний цикл зондування. До того ж вони мають малий показник багатоканальності системи, загальне число інформаційних каналів яких не перевершує $20 \div 30$ при досить великій відносній погрішності $\Delta\delta = 13 \div 15\%$ виміру сигналів у кожному каналі. Вимоги реєстрації максимальних по довжині реалізацій сигналу розсіювання з високими точністю й часовим дозволом пов'язане із забезпеченням показника багатоканальності вимірювальних систем на рівні $500 \div 2000$, і є дуже важливим як з погляду досягнення вірогідності результатів виміру, так і з погляду інформаційної продуктивності. Ступінь виконання даної вимоги визначає точність відновлення сигналу зворотного розсіювання і його повну неухвалювану енергію в напрямку прийому.

Фотодетектування сигналів широкого динамічного діапазону [8, с. 10]. Основні шляхи розширення діапазону пов'язані з розробкою фотодетекторів, що мають логарифмічну амплітудну характеристику і часове автоматичне регулювання посилення. Перспективним напрямком є розробка універсального методу управління чутливістю фотодетектора за законом, пов'язаному з енергетичними характеристиками детектуємих сигналів, і вироблення критеріїв для створення адаптивних алгоритмів обробки сигналів зворотного розсіювання з усередненням їх по ансамблі реалізації.

Досить значну погрішність у результат вимірів форми сигналів можуть вносити некомпенсовані флуктуації опорних часових шкал системи, що

визначають часові координати дискретизації процесу. Досить значну погрішність у результат вимірів форми сигналів можуть вносити некомпенсовані флуктуації опорних часових шкал системи, що визначають часові координати дискретизації процесу. У цьому зв'язку використання нефазуємих джерел опорної частоти пов'язане з появою невизначеності часового положення δT реперних точок шкали лазера, рівної

$$\delta T = \pm \frac{T_0}{2}, \quad (3)$$

де T_0 – період опорного нефазуємого генератора.

Це призводить до істотного зниження просторово-часового дозволу системи,

$$\Delta R = \frac{CT_0}{4} \quad (4)$$

Застосування фазуємих джерел опорної частоти дозволяє мінімізувати зазначені погрішності.

Питання підвищення метрологічних характеристик вимірювальних систем лазерно-локаційного призначення пов'язані зі створенням методів контролю й калібрування їхніх параметрів. Процес технічної діагностики лазерних засобів повинні проводитися як перед циклом вимірів у режимі заелементного контролю, так й у процесі проведення натурних вимірів.

Таким чином, побудова лазерної системи дистанційного зондування, що здійснює вимір параметрів локальних об'ємів простору, являє собою складне науково-технічне завдання, рішення якого визначається вибором реальних моделей вихідних параметрів й ефективного методу лазерних вимірів.

Результати досліджень, [7, с. 230], показали, що найбільш чутливим і селективним методом виміру поточних значень концентрації складових викидів вихлопних газів є метод диференційного поглинання й розсіювання лазерного випромінювання молекулами речовини досліджуваного компонента. При цьому було відзначено, що ефективність даного методу фактично визначається відношенням величин енергій прийнятих сигналів на двох різних довжинах хвиль, одна з яких $E(\lambda_0)$ відповідає лінії поглинання лазерного компонента в сліді аеродинамічного ланцюга, а інша $E(\lambda_w)$ перебуває поза цією лінією.

Дальність дії такої системи визначається рівнем прийнятих енергій сигналів, що у свою чергу, повинен бути не менш граничної чутливості приймального пристрою.

Основною перевагою лазерних засобів при вирішенні локаційних завдань є те, що результати зондування не залежать від характеру поверхні

і її параметрів, а визначаються тільки чутливістю й просторовим дозволом обраного методу лазерних вимірів.

Аналіз результатів зондування в реальному масштабі часу дозволяє з високою вірогідністю встановити факт знаходження в досліджуваній області простору будь-який об'єкт. Причому, залежно від типу об'єкта, у певних границях будуть мінятися склад сліду, концентрація часток й їхній просторовий розподіл, що, у свою чергу, може служити додатковою інформаційною ознакою селекції й розпізнавання цілей.

Для такого об'єкта лазерне рівняння з врахуванням однократного розсіювання описується відомим рівнянням [3, с. 59; 4, с. 25, 26]:

$$E(\lambda, R) = E_0 \cdot \xi(\lambda) \cdot T(\lambda)^2 \cdot Y(R) \cdot \beta_\pi(\lambda, R) \cdot \Delta R \cdot \frac{A}{R^2}, \quad (5)$$

де

$$T(\lambda) = \exp\left(\int_0^R K(\lambda, R) dR\right) \quad (6)$$

коефіцієнт пропускання атмосфери для довжин хвиль λ_0 на шляху R;

$K(\lambda, R)$ – коефіцієнт ослаблення в атмосфері;

E_0 – вихідна енергія лазерного імпульсу;

$\xi(\lambda)$ – коефіцієнт спектрального пропущення оптичної системи;

A/R^2 – тілесний кут, у якому здійснюється прийом сигналів оптичною системою;

A – площа лінзи або дзеркала об'єктива;

R – відстань до досліджуваного об'єму простору;

Y(R) – геометричний коефіцієнт, що враховує перекриття лазерного променя й кута поля зору приймального пристрою;

$$\Delta R = \frac{C \cdot \tau_d}{2} \text{ – просторове розрішення;}$$

τ_d – час детектування оптичного сигналу;

$\beta_\pi(\lambda, R)$ – об'ємний коефіцієнт зворотного розсіювання;

Для даного методу з урахуванням співвідношення (5) енергії прийнятих сигналів на двох довжинах хвиль із об'єму, довжиною R, будуть відповідно рівні:

$$E(\lambda_0, R) = E_0 \xi(\lambda_0) Y(R) \beta(\lambda_0, R) \Delta R \frac{A}{R^2} \exp(-2 \int_0^R (K(\lambda_0, R) + N(R) \sigma(\lambda)) dR) \quad (7)$$

$$E(\lambda_\omega, R) = E_0 \xi(\lambda_\omega) Y(R) \beta(\lambda_\omega, R) \Delta R \frac{A}{(R)^2} \exp(-2 \int_0^R K(\lambda_\omega, R) dR). \quad (8)$$

Аналіз виразів (7), (8) показує, що рівень розсіяного сигналу визначається багатьма параме-

трами, що залежать як від характеристик властивостей лазерної системи, так і від стану траси. Параметри, що залежать від конструктивних особливостей системи, звичайно задають або оцінюють розрахунковим шляхом. Для параметрів, що характеризують стан траси, необхідно задавати модельні профілі цих величин, що найбільш адекватно відбивають властивості реальної атмосфери. Їхнє моделювання потрібно також для прогнозу умов поширення оптичних хвиль через атмосферу. Багатопараметричність даних виразів диктує необхідність такого математичного моделювання роботи лазерної системи, що дозволяє оптимально вибрати характеристики приймально-передавального каналу і вимірювального пристрою, а також оцінити ефективність методу при вирішенні завдань виявлення об'єктів.

Оцінка дальності дії лазерної системи виходила з виразу (7), оскільки послаблення сигналу, викликане поглинанням досліджуваних компонентів газів лазерного випромінювання, є одним з основних обмежуючих факторів. У цьому випадку з врахуванням $R \gg \Delta R$ для випадку, коли домінуючим шумом є шуми темного струму, дальність зондування буде описуватися виразом [3, с. 59]:

$$R = \left[\frac{E_0 \cdot A \cdot c \cdot D^* \cdot \beta_\pi(\lambda_0, R) \cdot \xi(\lambda_0) \cdot \xi(R)}{2 \cdot q \cdot (A_d \cdot B)^{0.5}} \exp(-2 \int_0^R K(\lambda_0, R) dR) \right]^{\frac{1}{2}}. \quad (9)$$

Аналіз залежності дальності виявлення від енергії зондувального імпульсу $R=f(E, A, \tau)$ показав, що збільшення дальності зондування обмежується можливостями створення потужних передавачів, істотне збільшення дальності виявлення пов'язане зі значним ростом площі антени, помітного збільшення дальності зондування можна досягти за рахунок значного збільшення тривалості імпульсу, але при цьому погіршується роздільна здатність лазера.

Висновки. Лазерна система з врахуванням вимог до параметрів приймально-передавальних і вимірювального каналів здатна виявляти об'єкти на основі вимірів концентрації характерних для них газових компонентів. Ефективність функціонування й дальність дії такої системи залежить від вибору оптимальних моделей вихідних параметрів, умов локації й механізму розсіювання лазерного випромінювання.

Список літератури:

1. Пентагон: боротьба з БПЛА виходить на новий рівень. Armyinform веб-сайт. URL: <https://armyinform.com.ua/2023/03/15/pentagon-borotba-z-bpla-vyhodyt-na-novuj-riven> 2с. (дата звернення: 08.08.2023).

2. Єрилкін А.Г. Огляд та аналіз світового досвіду боротьби з ударною безпілотною авіацією. А.Г. Єрилкін, Д.О. Гур'єв, Д.В. Карлов, О.В. Коробецький, Ю.А. Шевченко. Наука і техніка Повітряних Сил Збройних Сил України. 2022. № 4 (49). С. 15-22.

3. Романюк В.А. Оцінювання можливостей використання лазерного методу диференціального поглинання і розсіювання для виявлення факту перетину периметра, що охороняється. В.А. Романюк, А.А. Побережний, О.М. Сальников. Збірник наукових праць. Академія ВВ МВС України – Х. : Акад. ВВ МВС України, 2013. Вип. 2. С. 58-60.

4. Романюк В.А. Дослідження можливості підвищення точності вимірювань концентрації частинок вибухових речовин методами дистанційного зондування. В.А. Романюк, С.О. Стародубцев, С.В. Шаповалов. Радіотехніка. Всеукр. міжвід. наук.-техн. зб. 2018. Вип. 194. С. 23-28.

5. Боротьба з безпілотними літальними апаратами (за досвідом проведення ООС (раніше АТО). — Київ: «Центр учбової літератури», 2022. 43 с.

6. Малявкін Л.Н. Установка для дистанційного виявлення забруднень атмосфери за спектрами комбінаційного розсіяння світла. Л. Н. Малявкін, Ю.Г. Вайнер, В.В. Золотарьов. Журнал прикладної спектроскопії, 1977. Т. 26. вип. 1. С. 174-179.

7. Ванін Н.В. Лідар для дослідження атмосфери різними методами. Н.В. Ванін, А.В. Мигулін, С.Ю. Рибаків: Квантова електроніка, 1976. Т. 3, № 9. С. 229-234.

8. Демьянова Т.А. Порівняльна ефективність різних способів обробки сигналу на виході фотопомножувача. Т.А. Демьянова, Г.М. Креков, М.М. Крекова. Оптико-механічна промисловість, 1973. № 6. С. 9-11.

Romanyuk V.A., Starodubtsev S.O. STUDY OF THE EFFICIENCY OF LASER METHODS FOR THE DETECTION OF UNMANNED AIRCRAFT DEVICES

The article is devoted to the definition of methods of countering small-sized aircraft, which have a small effective reflective surface. Today, the development and testing of various laser systems is rapidly developing in the world. Laser weapons have already been tested on land/water/air/space. Tests show the effectiveness of new developments, and only existing technologies limit scientists in the development of lasers. Private and state organizations of various countries are working on the development of laser systems, and the prospects for their use are only a matter of time. This also applies to the problem of detecting unmanned aircrafts.

It has been found that it is difficult to detect such objects with existing means of air defense, especially in the dark, when it is impossible to visually identify them. But it is possible to do this thanks to the use of laser devices that obtain information about such objects by methods that determine the significant difference in the optical-atmospheric characteristics of the area of space disturbed by the aircraft relative to the surrounding air.

Radar and laser systems work on the signal reflected from the unmanned aircraft, and the proposed means analyze the radiation scattered by the aircraft's wake using laser probing methods. The interaction of radiation with the environment is manifested in the form of such physical phenomena as aerosol and molecular scattering, resonance absorption, combination, resonance types of scattering, a change in the form of the received signal, Doppler absorption and an increase or decrease in the radiation frequency. The backscattered signal contains information about the characteristics of the area of space in which the sounding was carried out.

The processing of sounding results makes it possible to determine in the current time with a high probability whether there is or is not an aircraft in the area of space where the sounding was carried out. Thus, in the airspace under investigation, within certain limits, the concentration of particles and their spatial distribution relative to the undisturbed part of the air space will change, which will serve as an informative sign of the presence of air objects in a given volume of air space.

Key words: laser weapons, sounding methods, laser radiation, radiation parameters.

РАДІОТЕХНІКА ТА ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЇ

УДК 621.396.49

DOI <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2023.5/06>**Адаменко І.О.**Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»**Лисенко О.М.**Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

МЕТОДИ ВИЗНАЧЕННЯ ПАРАМЕТРІВ ОБ'ЄКТІВ В БАГАТОКАНАЛЬНИХ СИСТЕМАХ ДЕТЕКТУВАННЯ ТА КЛАСИФІКАЦІЇ

У статті розглянуто основні методи дистанційного визначення параметрів об'єктів (геометричних розмірів, швидкості, координат тощо), які використовуються в багатоканальних системах для їх детектування і класифікації. Проведено аналіз супутникового, інерційного, астронавігаційного, оптичного (у видимому, інфрачервоному та ультрафіолетовому діапазонах), лазерного і радіолокаційного методів та встановлено переваги і недоліки кожного із них. З метою підвищення точності дистанційного визначення параметрів запропоновано поєднання у зазначених системах використання декількох методів, реалізованих у вигляді телевізійного, тепловізійного та радіолокаційного каналів та наведено структуру багатоканальної системи, що його реалізує. Таке рішення також знижує можливість одночасного ураження всіх чутливих елементів системи активними системами протидії та підвищує завадостійкість системи. Для розпізнавання об'єкта запропоновано використання кореляційно-екстремальних алгоритмів порівняння зображення, що отримується в інфрачервоному діапазоні з переведеними в цифровий формат знімками заданих об'єктів, які можуть бути отримані в ході попередньої підготовки. Заплановано також реалізацію принципу комбінованого самонаведення залежно від типу об'єкта та умов оточуючого середовища, відповідно до яких автоматично вибирається основний оптимальний метод, що реалізується в одному із 3-х каналів, а інші задіюються паралельно для формування контрастного зображення об'єкта. Основними перевагами запропонованого рішення є підвищена точність, можливість застосування в умовах складних завод і метеорологічних умов, оптимізовані масогабаритні характеристики апаратури, порівняно невисока вартість.

Ключові слова: детектування, дистанційне визначення, розміри об'єкта, положення, швидкість, визначення типу об'єкта, радіолокаційний, тепловізійний, телевізійний канали, оптичний метод.

Постановка проблеми. Завдання дистанційного визначення параметрів об'єктів, зокрема, їх координат, геометричних розмірів, переміщень, швидкості та типу, яке наразі вирішується при детектуванні і класифікації об'єктів багатоканальними системами їх пошуку та виявлення, є важливим для військової і автомобільної галузей, робототехніки, систем безпеки тощо. При цьому актуальним залишається питання їх подальшого удосконалення в напрямку підвищення точності та завадостійкості (можливості застосування в умовах складних завод і метеорологічних умов) при оптимізованих масогабаритних характеристиках і порівняно невисокій вартості.

Аналіз останніх досліджень і публікацій.

Насамперед, доцільно більш детально зупинитися на розгляді сучасних підходів, які використовуються в існуючих технічних рішеннях для дистанційного визначення параметрів об'єктів, а саме їх розмірів, типу, швидкості, положення тощо.

Серед основних базових методів слід відзначити наступні:

- супутникові;
- інерційні;
- астронавігаційні;
- оптичні (у видимому діапазоні);
- оптичні (у інфрачервоному діапазоні);
- оптичні (в ультрафіолетовому діапазоні);

- лазерні;
- радіолокаційні.

Супутниковий метод використовують для визначення координат об'єктів, отримання значення їх швидкості та напрямку руху. Такі системи складаються з космічного обладнання та наземної системи керування.

Принцип роботи супутникових систем заснований на вимірюванні відстані від антени на об'єкті (координати якого необхідно отримати) до супутників, положення яких відоме з великою точністю. Знаючи відстані до кількох супутників системи, положення об'єкта в просторі можна розрахувати за допомогою звичайних геометричних побудов [1].

Процедура вимірювання відстані від супутника до антени приймача заснована на тому, що швидкість поширення радіохвиль є відомою. Кожен супутник навігаційної системи надсилає сигнал точного часу з годинника, точно синхронізованого із системним часом. При подальшому прийомі сигналів супутниковим приймачем обчислюється затримка між часом випромінювання, що міститься в самому сигналі та часом прийому сигналу. Маючи в своєму розпорядженні цю інформацію, навігаційний приймач розраховує координати антени. Усі інші параметри руху (швидкість, курс, пройдена відстань) обчислюються шляхом вимірювання часу, необхідного об'єкту для переміщення між двома або більшим числом точок з конкретними координатами.

У патентах на винаходи [2–4] описані структури побудови систем, які засновані на використанні супутникового методу. Окрім складної технічної реалізації цього методу, його низької завадостійкості ще одним його недоліком є використання значення швидкості поширення радіохвилі як сталої відомої величини, яка не враховує вплив непрогнозованих факторів таких як характеристики іоносферного шару тощо.

Неавтономні методи вирішення завдання ґрунтуються на використанні зовнішніх орієнтирів або сигналів (наприклад, зірок, маяків, радіосигналів тощо). Ці методи в принципі досить прості, але в ряді випадків не можуть бути реалізовані через відсутність видимості або наявності завад для радіосигналів. Необхідність створення автономних навігаційних систем спричинило створення інерційної навігації.

Інерційний метод забезпечує визначення координат, параметрів руху об'єкта і керування ним та заснований на інерційних властивостях тіл. Він є автономним, тобто не вимагає наявності

зовнішніх орієнтирів або сигналів, що надходять ззовні [5].

Сутність методу полягає у визначенні прискорення об'єкта та його кутових швидкостей за допомогою встановленого на об'єкті вимірювального пристрою. Обробка цих параметрів дає змогу визначити розташування (координати) цього об'єкта, його траєкторію, швидкість, пройдений шлях тощо. Це здійснюється за допомогою датчиків лінійного прискорення (акселерометрів), гіроскопічних пристроїв, що відтворюють на об'єкті систему відліку і дозволяють визначати кути повороту та нахилу об'єкта, а також обчислювальних компонентів, які за прискоренням знаходять швидкість об'єкта та його координати.

Перевага інерційного методу полягає в його автономності, можливості повної автоматизації всіх процесів навігації, високій інформативності та можливості передавання інформації на великій швидкості. Відсутність будь-якого випромінювання під час роботи забезпечує високий захист від завад і можливість бути непоміченими іншими пристроями. Завдяки цьому метод інерційної навігації отримує все більш широке застосування при вирішенні проблем навігації надводних, підводних та повітряних суден, космічних суден, апаратів та інших об'єктів, що рухаються.

Недоліком інерційного методу є наявність помилок та похибок, які накопичуються з часом в інформації, що отримують від датчиків та обчислювальних компонентів. Також неправильне початкове налаштування обладнання дає хибні результати обчислювання, які впливають на загальний результат. Для їх корекції створюються інтегровані системи, які доповнюються даними, що надходять від неавтономних систем, наприклад, супутникової навігації. Ще одним недоліком цього методу є досить висока вартість обладнання, що забезпечує реалізацію методу.

Астронавігаційний метод враховує недоліки розглянутих вище двох методів шляхом комплексування даних, отриманих з використанням супутникового та інерційного методу. До складу системи, що його реалізує, входить додатковий пристрій збору та попередньої обробки астрономічної інформації. Астроінерціальні навігаційні системи застосовуються на бортах літаків стратегічної авіації, космічних літальних апаратах та крилатих ракетах.

Астронавігаційна система використовується у військових цілях: в крилатих ракетах та безпілотних літальних апаратах (БПЛА) у разі радіоелектронної протидії (РЕБ) противника. Як тільки

система навігації крилатої ракети або БПЛА виявляє вплив засобів РЕБ супротивника, блокування або спотворення сигналу GPS, вона запам'ятовує останні координати та перемикається на інерційну систему навігації [6].

Оптичний метод (у видимому діапазоні) можна вважати найпростішим, оскільки визначення параметрів об'єктів відбувається на основі аналізу відеопотоку [7]. Реалізація методу здійснюється оптико-електронною системою шляхом фокусування потоку променистої енергії від об'єкта, його модуляції та перетворення в електричний сигнал. Принцип роботи системи побудовано на порівнянні зображень з еталоном та/або з попереднім зображенням. Розузгодження положень цих зображень дозволяє визначити координати об'єкта. Аналіз отриманого відеопотоку, за необхідністю, дає змогу виконати визначення типу об'єкта та його орієнтовних розмірів.

Недоліками цього методу є необхідність підсвічування об'єкта, високі вимоги до якості повітря навколо нього (наприклад, відсутність задимлення тощо), наявність актуальної бази зображень об'єктів, досить великий обсяг пам'яті та потреба швидкого доступу до неї.

В основу **оптичного методу (в інфрачервоному діапазоні)** покладено принцип уловлювання хвиль інфрачервоного діапазону, що випромінюються досліджуванним об'єктом. Оптичний блок оптико-електронної системи, що реалізує метод, являє собою дзеркально-лінзовий об'єктив, встановлений на роторі гіроскопа і обертається разом з ним, збираючи теплову енергію, що випромінюється об'єктом. Фотоприймач перетворює імпульси теплового випромінювання в електричний сигнал, що несе в собі інформацію про значення і напрям кутової неузгодженості між оптичною віссю об'єктива та лінією візування об'єкта [8].

Зазвичай, такі оптико-електронні системи використовують діапазон хвиль від 1 мкм до 5 мкм, оскільки саме у цьому діапазоні спостерігається максимум теплового випромінювання більшості повітряних об'єктів.

Основна перевага цього методу полягає у можливості застосування пасивного способу наведення на об'єкт, а його суттєвим недоліком є залежність дальності дії оптико-електронної системи від метеорологічних умов.

Оптичний метод (в ультрафіолетовому діапазоні) визначення параметрів об'єктів аналогічний розглянутому вище оптичному методу в інфрачервоному діапазоні, окрім того, що використовуються хвилі значно меншої довжини. Це

дозволяє розпізнавати значну кількість теплових пасток, що наводяться, проте зменшує дальність виявлення/захоплення об'єктів. Недоліком методу також є залежність технічного рішення, що його реалізує, від погодних умов експлуатації.

Сутність **лазерного методу** полягає в тому, щоб за допомогою лазера підсвітити об'єкт, отримати віддзеркалений промінь на приймач та за отриманими даними (а саме часом проходження променя) обрахувати координати об'єкта.

Реалізація цього методу є достатньо нескладною, проте є обмеження по дальності та висоті (через обмеження по потужності випромінювача та конструктивні особливості приймача).

Радіолокаційний метод [9] заснований на ймовірності зустрічі радіохвиль з іншими об'єктами та розсіюванні на них. Відбита від об'єкта хвиля (або власне випромінювання) дозволяє радіолокаційним системам виявляти та ідентифікувати об'єкт, виміряти дальність до нього та його кутові координати (з похибкою). На основі ефекту Доплера радіальна швидкість сигналу випромінювання розраховується на основі частоти прийнятого сигналу відбиття.

Існує два основних режими роботи радіолокаційних станцій та обладнання. Перший – моніторинг середовища. Під час огляду рух променя може бути круговим, конічним або сегментарним. Наприклад, антена решітка може обертатися при скануванні по колу (за азимутом). У режимі стеження антена завжди орієнтована на обраний об'єкт. Для її обертання, виходячи з напрямку рухомого об'єкту, використовуються системи автоматичного супроводу.

Від тактичних і технічних характеристик обладнання багато в чому залежить ефективність і якість розв'язуваних завдань. До таких показників належать:

- Поле зору, мінімальний і максимальний діапазон огляду, азимутальний кут і кут місця.
- Дальність, азимут, висота та швидкість (можливість визначення параметрів найближчих об'єктів).
- Точність вимірювання, що визначається наявністю грубих, систематичних або випадкових похибок.
- Безпека та надійність.
- Ступінь автоматизації прийому та обробки вхідних потоків даних.

Конструктивні особливості задаються при проектуванні технічних рішень системи з використанням декількох основних технічних показників, серед яких:

- несуча частота та модуляція генерованих коливань;
- діаграми спрямованості антен;
- потужність передавальних і приймаючих пристроїв;
- розмір і вага системи.

Радіолокаційні системи набули широкого поширення завдяки своїм винятковим характеристикам функціонування в різних погодних умовах і здатності відстежувати об'єкт будь-якого типу і на різних відстанях. Недоліком методу слід вважати видимість для інших пристроїв і систем роботи технічного рішення, що його реалізує, за рахунок випромінювання радіосигналу.

Постановка завдання. Викладене вище визначає актуальність та диктує необхідність проведення порівняльного аналізу розглянутих методів визначення параметрів об'єктів та вибір базових із них для розроблення структури багатоканальної системи на їх основі.

Виклад основного матеріалу дослідження. Проаналізувавши розглянуті вище основні базові методи, які використовуються для визначення положення об'єкта, його швидкості, траєкторії та послідуєчої його класифікації, можна зробити висновок про наступне.

Супутниковий, інерційний та астронавігаційний методи не підходять для вирішення поставленого завдання, оскільки вони передбачають встановлення початкових точних координат досліджуваного об'єкта для побудови його траєкторії та

визначення швидкості. Також ці методи не забезпечують вирішення подальшого завдання класифікації об'єкта. В свою чергу, оптичні методи (у видимому, інфрачервоному та ультрафіолетовому діапазонах) дозволяють виконати класифікацію об'єкта за допомоги наявної актуальної бази еталонів. Їх використання дозволяє виконувати знаходження та супровід об'єктів без чітких початкових координат (у порівнянні з супутниковим, інерційним та астронавігаційним методами). Однак, оптичні методи мають високу залежність від метеорологічних умов, які будуть впливати на точність отриманого результату під час їх експлуатації.

Тому для забезпечення виконання поставленого завдання та підвищення точності отриманого кінцевого результату запропоновано поєднання декількох методів дистанційного визначення параметрів, а саме оптичних (у видимому та інфрачервоному діапазонах) і радіолокаційного. Кожен із них має свої переваги та недоліки, але їх поєднання та реалізація технічних рішень в одній системі дозволяє підвищити точність та завадостійкість визначення параметрів об'єкта.

Розглянемо структурну схему запропонованого технічного рішення, яке складається з трьох каналів (телевізійного, тепловізійного та радіолокаційного) шляхом поєднання відповідних обраних методів (рис. 1).

Телевізійний канал містить матрицю з чутливих елементів (відеокамеру), що розміщується у фокальній площині оптичної системи. Тепловізійний канал

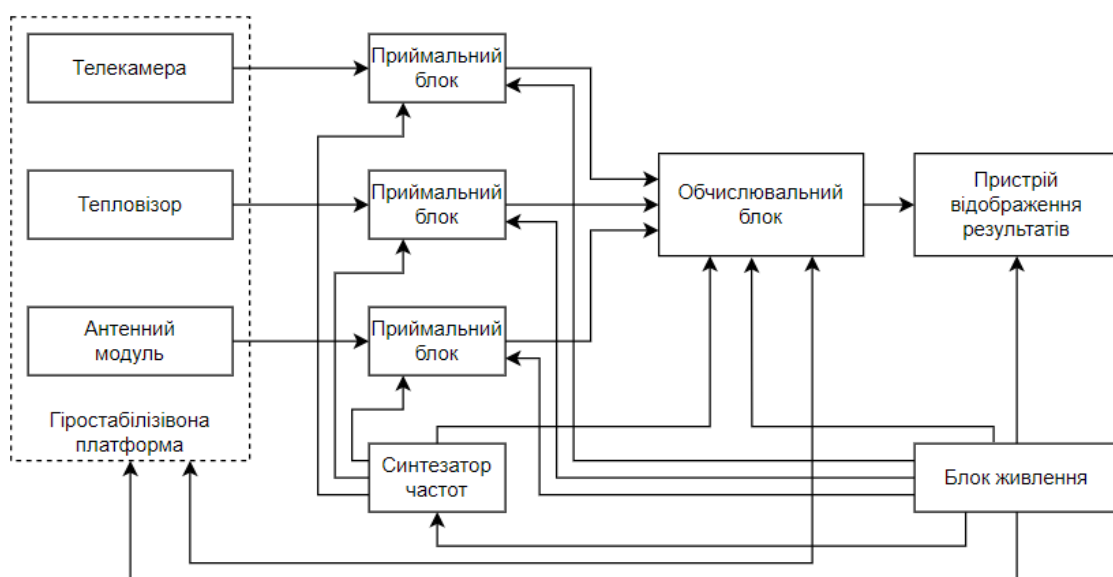


Рис. 1. Структура багатоканальної системи детектування та класифікації об'єктів на основі телевізійного, тепловізійного та радіолокаційного каналів

містить тепловізор, результат зчитування з якого буде посилюватись, модулюватись та передаватись в обчислювальний блок обробки. Радіолокаційний канал містить антенну систему, також підключену через приймальний блок до обчислювального блоку.

Для визначення кутової швидкості використовують датчик з електронною або гіроскопічною стабілізацією, який супроводжує об'єкт.

Конструктивно оптико-електронний блок тепловізійного та тепловізійного приймачів і антена радіолокації виконані в єдиній системі, що забезпечує їх роздільну або спільну роботу в процесі її функціонування.

В обчислювальному блоці реалізуються алгоритмічні та програмні рішення автоматичного розпізнавання об'єкта, у тому числі у складних метеорологічних умовах та вночі, що забезпечується, насамперед, застосованими в системі оптичним (в інфрачервоному діапазоні) та радіолокаційним методами. Зокрема, для розпізнавання об'єкта пропонується застосування кореляційно-екстремальних алгоритмів порівняння зображення, що отримується в інфрачервоному діапазоні з переведеними в цифровий формат знітками заданих об'єктів, які можуть бути отримані в ході попередньої підготовки. Заплановано також реалізацію принципу комбінованого самонаведення залежно від типу об'єкта та умов оточуючого середовища, відповідно до яких автоматично вибирається оптимальний метод, що реалізується в одному із 3-х каналів, а інші задіюються паралельно для формування контрастного зображення об'єкта.

Висновки. У роботі розглянуто основні методи дистанційного визначення параметрів об'єктів (геометричних розмірів, швидкості, координат тощо), які використовуються в багатоканальних системах для їх детектування і класифікації. Проведено аналіз супутникового, інерційного,

астронавігаційного, оптичного (у видимому, інфрачервоному та ультрафіолетовому діапазонах), лазерного і радіолокаційного методів та встановлено переваги і недоліки кожного із них.

З метою підвищення точності дистанційного визначення параметрів запропоновано поєднання у зазначених системах використання декількох методів, реалізованих у вигляді тепловізійного, тепловізійного та радіолокаційного каналів та наведено структуру багатоканальної системи, що його реалізує. Таке рішення також знижує можливість одночасного ураження всіх чутливих елементів системи активними системами протидії та підвищує завадостійкість системи.

Для розпізнавання об'єкта запропоновано використання кореляційно-екстремальних алгоритмів порівняння зображення, що отримується в інфрачервоному діапазоні з переведеними в цифровий формат знітками заданих об'єктів, які можуть бути отримані в ході попередньої підготовки. Заплановано також реалізацію принципу комбінованого самонаведення залежно від типу об'єкта та умов оточуючого середовища, відповідно до яких автоматично вибирається основний оптимальний метод, що реалізується в одному із 3-х каналів, а інші задіюються паралельно для формування контрастного зображення об'єкта.

Основними перевагами запропонованого рішення є підвищена точність визначення параметрів об'єктів, можливість застосування в умовах складних завад і метеорологічних умов, оптимізовані масогабаритні характеристики апаратури та потенційно порівняно невисока вартість.

Напрямок подальших досліджень є розроблення на основі запропонованої структури конструктивних, схемотехнічних, алгоритмічних і програмних рішень реалізації багатоканальної системи визначення параметрів об'єкта.

Список літератури:

1. Барабан М. В., Довгалець К. С., Щирич О. С. Розробка програмного забезпечення для знаходження шляху між двома точками за допомогою Google Maps API. *ISSN 1997-9266. Вісник Вінницького політехнічного інституту*. 2018. № 6. <https://doi.org/10.31649/1997-9266-2018-141-6-90-94>
2. Система високоточного визначення координат на основі супутникових радіонавігаційних систем : пат. 78185 Україна : МПК G01S5/14. № u 2012 10591 ; заявл. 10.09.2012 ; опубл. 11.03.2013.
3. Спосіб визначення координат пунктів спостереженнями сигналів супутникової навігаційної системи : пат. 80415 Україна : МПК G01C21/00. № u 2012 14315 ; заявл. 14.12.2012 ; опубл. 27.05.2013.
4. Супутникова радіонавігаційна система : пат. 90960 Україна : G01S5/14. № а 2008 14890 ; заявл. 24.12.2008 ; опубл. 26.04.2010.
5. Волоконно-оптичні гіроскопи. [Електронний ресурс] : навч. посіб. для студ. спеціальності 151 «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології», освітня програма «Комп'ютерно-інтегровані системи та технології в приладобудуванні» / О. К. Кучеренко; КПІ ім. Ігоря Сікорського. – Електронні текстові дані (1 файл: 3.59 Мбайт). – Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2023. 106 с.

6. Кузовков Н. Т., Саличев О. С. Інерціальна навігація і оптимальна фільтрація. М.: Машинобудування, 1982.
7. Sanada, A., Ishii, K. and Yagi, T., Self-localization of an omnidirectional mobile robot based on an optical flow sensor, *Journal of Bionic Engineering*, 2010. No. 7, pp. 172-176.
8. Інфрачервона головка самонаведення : пат. 151385 Україна : F41G7/22. № у 2022 00363 ; заявл. 31.01.2022 ; опубл. 13.07.2022.
9. Васін В.В. Методи вимірювання координат та радіальної швидкості об'єктів у радіотехнічних вимірювальних системах. Конспект лекцій. – М: МІЕМ 1975р.

Adamenko I.O., Lysenko O.M. METHODS OF DETERMINING OBJECT PARAMETERS IN MULTI-CHANNEL DETECTION AND CLASSIFICATION SYSTEMS

The article discusses the main methods of remote determination of object parameters (geometric dimensions, speed, coordinates, etc.), which are used in multi-channel systems for their detection and classification. An analysis of satellite, inertial, astronavigational, optical (in the visible, infrared and ultraviolet ranges), laser and radar methods was carried out and the advantages and disadvantages of each of them were established. In order to increase the accuracy of remote determination of parameters, a combination of the use of several methods implemented in the form of television, thermal imaging, and radar channels is proposed in the specified systems, and the structure of the multi-channel system that implements it is given. This solution also reduces the possibility of simultaneous damage to all sensitive elements of the system by active countermeasure systems and increases the immunity of the system. For object recognition, it is proposed to use correlation-extremal algorithms for comparing the image obtained in the infrared range with digitalized images of given objects that can be obtained during preliminary preparation. It is also planned to implement the principle of combined homing depending on the type of object and the conditions of the surrounding environment, according to which the main optimal method is automatically selected, which is implemented in one of the 3 channels, and the others are used in parallel to form a contrast image of the object. The main advantages of the proposed solution are increased accuracy, the possibility of application in conditions of complex obstacles and meteorological conditions, optimized weight and size characteristics of the equipment, and relatively low cost.

Key words: detection, remote sensing, object dimensions, position, speed, object type determination, radar, thermal imaging, television channels, optical method.

УДК 62-529

DOI <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2023.5/07>**Губар В.Г.**Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»**Лисенко О.М.**Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

ПОРІВНЯЛЬНИЙ АНАЛІЗ СТРУКТУРНО-ФУНКЦІОНАЛЬНОЇ ОРГАНІЗАЦІЇ БАГАТОКАНАЛЬНИХ СИСТЕМ ДЕТЕКТУВАННЯ І КЛАСИФІКАЦІЇ ОБ'ЄКТІВ ДЛЯ МОБІЛЬНИХ ПЛАТФОРМ ТА ОБҐРУНТУВАННЯ ВИБОРУ АРХІТЕКТУРИ РОЗРОБЛЮВАНОВОГО РІШЕННЯ

У роботі розглянуто принципи структурно-функціональної організації багатоканальних систем детектування і класифікації об'єктів на зображеннях та відеопослідовностях, наведено результати їх порівняльного аналізу, що диктується потребою їх подальшого удосконалення з метою підвищення достовірності детектування та класифікації. Основними критеріями для порівняння є функціональне призначення окремих каналів системи та послідовність обробки в них потоку даних. Розглянуто ряд відомих підходів щодо структурно-функціональної організації багатоканальних систем та їх реалізації на основі: комплексування зображень каналів, паралельного багатоканального аналізу даних, мультиплексування зображень каналів.

Запропоновано удосконалену архітектуру багатоканальної системи детектування і класифікації та розглянуто особливості її реалізації на мобільних (рухомих) платформах. Встановлено необхідність та актуальність використання програмної реалізації методу комплексування зображень з телевізійного та тепловізійного каналів системи. Запропоновано використання додаткових каналів телеметрії (азимут, швидкість, висота тощо) з метою підвищення достовірності детектування та класифікації об'єктів. При цьому інформація з додаткових каналів використовується як при аналізі зображень, так і при формуванні кінцевого результату та прийнятті рішення щодо корекції курсу слідування рухомої платформи.

Архітектура такої системи розроблена з урахуванням використання в побудові мобільних (рухомих) платформ. Застосування подібних платформ можливе як у стаціонарному режимі при спостереженні та супроводженні об'єктів, так і як платформ для доставки корисних вантажів до заданої локації з можливістю автопілоту з коригуванням маршруту руху. Локація може бути введена за допомогою певних характеристик об'єкту.

Ключові слова: багатоканальна система, телеметрія, радіоканал, лазерний канал, інфрачервоний, тепловізійний, візуальний, комплексування зображень, комутатор, паралельна обробка.

Постановка проблеми. Відомо, що виявлення об'єктів та їх класифікація на зображеннях і відеорядах є актуальним на сьогодні для широкого кола людської діяльності, насамперед, у військовій та медичних галузях, робототехніці, системах безпеки тощо. В основному детектування здійснюється на окремих зображеннях і послідовностях зображень (відеорядах), отриманих у різних діапазонах хвиль (видимий, інфрачервоний). Вимоги сьогодення диктують необхідність виконувати виявлення та класифікацію об'єктів у режимі реального часу та з високою достовірністю.

Особливу популярність набули багатоканальні системи, де необхідно аналізувати потік інформації з декількох джерел (каналів) одночасно. При цьому джерела можуть продукувати різні за характеристиками дані (зображення та їх послідовності, фізичні величини, зокрема, положення об'єкту, його швидкість, відстань до нього тощо). Насамперед, саме використанням багатоканальності систем досягається підвищення ефективності виявлення об'єктів та їх класифікації на зображеннях та відеорядах.

Наразі такі системи будуються за принципом програмно-апаратних комплексів, у яких збір

інформації по каналам виконується апаратною частиною, а аналіз даних – програмною. При цьому достовірність таких систем щодо основної функції виявлення об’єктів залежить від їх структурно-функціональної організації, а саме: визначення основних та допоміжних каналів, послідовності обробки даних в них, застосованих методів аналізу та класифікації. Поряд із цим отримані дані з допоміжних каналів можуть використовуватися для уточнення результатів аналізу даних з основних (телевізійного та тепловізійного) каналів, що дозволяє отримати більш достовірний результат.

Структурно-функціональна організація таких багатоканальних програмно-апаратних систем детектування та класифікації об’єктів за послідовністю обробки даних передбачає реалізацію 3-х підходів:

- комплексування зображень каналів;
- паралельний багатоканальний аналіз даних;
- мультиплексування зображень каналів.

Особлива увага наразі приділяється можливості побудови та розгортання таких систем на мобільних рухомих платформах. Така особливість використання накладає додаткові вимоги як щодо конструкції, так і щодо реалізації функціональності програмно-апаратних комплексів.

Аналіз останніх досліджень та публікацій. Зупинимося більш детально на особливостях

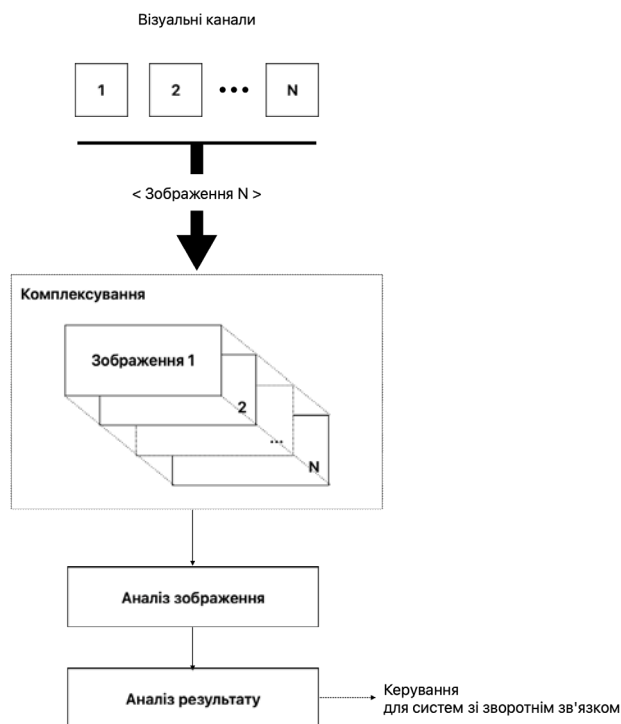


Рис. 1. Реалізація комплексування зображень каналів

структурно-функціональної організації багатоканальних систем детектування та класифікації, які реалізують вищевказані підходи.

Комплексування даних каналів

Реалізацію цього підходу в багатоканальних системах детектування розглянуто в роботах [1–3] та наведено нижче на рис. 1.

Суть цього підходу полягає в точному просторовому суміщенні зображень у каналах, що дає можливість покращити інформаційну складову результуючого зображення у порівнянні з кожним окремим зображенням та, як наслідок, створити цим самим передумови для підвищення достовірності детектування об’єктів. Точне просторове суміщення зображень досягається двома шляхами: конструктивно – шляхом суміщення оптичних осей у вхідному блоці багатоканальної системи та програмно – шляхом комплексування даних.

Перший шлях конструктивного суміщення досліджується в роботі [1]. Згідно її результатів для отримання задовільних результатів комплексування зображень точність просторового суміщення полів зору каналів має відповідати методам комплексування. Зазначено, що найвищу якість суміщення полів зору при цьому забезпечують оптичні системи з коаксіальним розташуванням об’єктивів каналів, а у разі використання штатних об’єктивів – схеми з дихроїчними світлорозділювачами.

Приклад програмного комплексування досліджено у роботі [3]. Згідно наведених там результатів комплексування даних двох каналів дозволяє суттєво підвищити інформативність результуючого зображення, що дало змогу збільшити ймовірність виявлення об’єкта в умовах наявності завад та шумів до 15% у порівнянні із застосуванням класичних методів.

У роботі [4] авторами запропоновано метод комплексування, який на відміну від класичних дає змогу сумістити зображення, сформовані сенсорами різної фізичної природи в багатоканальних системах моніторингу. Для точного комплексування зображень в таких системах спочатку виконується суміщення зображень, отриманих з різних джерел. Запропоновано використання методів, які є інваріантними до перетворення яскравості, зокрема, метод, що використовує як критерій подібності зображень максимум функції взаємної інформації між зображеннями.

Паралельний багатоканальний аналіз

Реалізація паралельного аналізу даних по декільком каналам наведена на рис. 2.

Основна відмінність цього підходу від розглянутого вище комплексування зображень – це

наявність блоку аналізу для кожного з візуальних каналів та окремого блоку вибору результату. Цей підхід пришвидшує отримання результатів аналізу за рахунок паралельності, однак він є апаратно збитковим при апаратній реалізації, а при програмній – зростають вимоги до обчислювальних спроможностей багатоканального аналізатора. Результати використання цього підходу при структурно-функціональній організації багатоканальної системи аналізу зображень наведено в роботах [5, 6].

У патенті [7] розглянуто систему відстеження людей, яка складається з двох візуальних каналів та містить складові, наведені нижче на рис. 3.

Аналіз даних виконується у блоках відстеження та детектування кожного із каналів. Результати

обробки в кожному окремому каналі (місцезнаходження людей та теплові локації) вирівнюються в просторо-часовому відношенні у блоці просторо-часового вирівнювання.

У іншому патенті [8] розглянуто двоканальну систему виявлення об'єктів у межах контрольованої зони. Блок спостереження зазначеної системи наведено на рис. 4.

Система проводить аналіз зображень з відеокамери та інфрачервоного сенсору. Відповідно у блоках “DSP модуль” та “IP модуль детектування” проводиться аналіз візуальних даних. Результати аналізу передаються на центральну станцію моніторингу.

Основним недоліком паралельної обробки зображення по окремим каналам є апаратна надлишко-

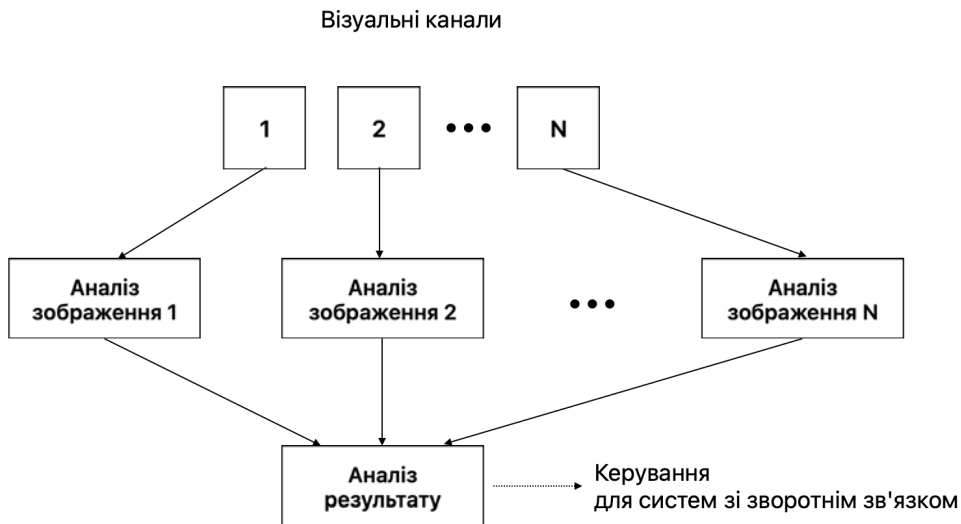


Рис. 2. Реалізація паралельного багатоканального аналізу зображень



Рис. 3. Структурна схема системи відстеження людей згідно [7]

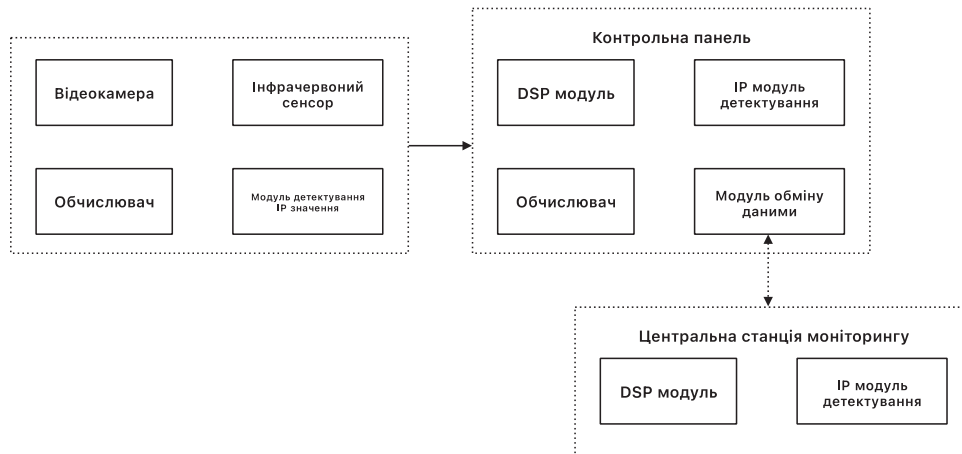


Рис. 4. Структура блока спостереження системи згідно [8]

вість реалізації, яка може бути критичною для використання в мобільних (рухомих) платформах.

Мультиплексування зображень каналів

Суть цього підходу обробки зображень візуальних каналів зводиться до вибору того чи іншого каналу для проведення подальшого аналізу (рис. 5). При цьому канали можуть обиратися як послідовно, так і по певному критерію – чіткості, контрастності зображення тощо. Важливим компонентом такої реалізації є мультиплексор, основними вимогами до якого в залежності від складності переключення/вибору каналів є наступні: швидкодія, пропускна спроможність, наявність можливості вибору робочого каналу.

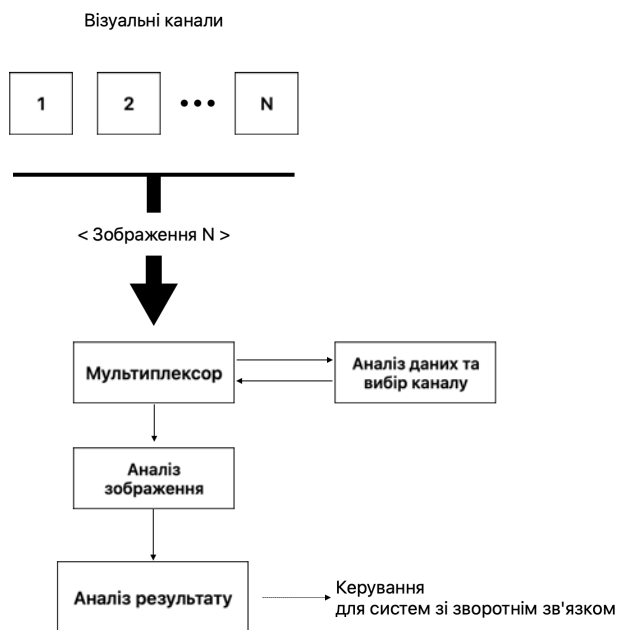


Рис. 5. Реалізація мультиплексування зображень каналів

В роботі [9] запропоновано структурно-функціональну організацію комплексу обробки відео-

потоків, що використовує процедуру мультиплексування каналів (рис. 6).

Комплекс обробляє послідовність зображень, що отримується від цифрової відеокамери та тепловізора. Відеопотоки через комутатор (мультиплексор) передаються до блоку серіалізатора, де препаруються для передачі через послідовний інтерфейс (диференціальна пара) на блок десеріалізатора споживача.

В цьому рішенні однією з головних вимог до комутатора є необхідність швидкого переключення ним відеопотоків від різних джерел та можливість підключення відеокамер з різним протоколом обміну даними.

Використання мультиплексування зображень каналів для їх обробки в багатоканальних системах застосовуються в рішеннях, де блок збору інформації та блок обробки рознесені у просторі. До недоліків цього підходу слід віднести необхідність застосування в системі блоків серіалізатора та десеріалізатора, однією з головних вимог до яких є їх швидкодія.

Постановка завдання. Наведений вище аналіз досліджень та публікацій дозволяє визначити основну тенденцію побудови багатоканальних систем для детектування та класифікації об'єктів на відеопослідовностях – це використання ними суто візуальних каналів.

З метою підвищення достовірності детектування та класифікації об'єктів запропоновано враховувати в їх структурно-функціональній організації наступні особливості:

- використання візуальних каналів для отримання відеопотоку як основних;
- використання додаткових каналів (телеметрії, радіолокаційного, лазерного) для уточнення ситуативної картини;

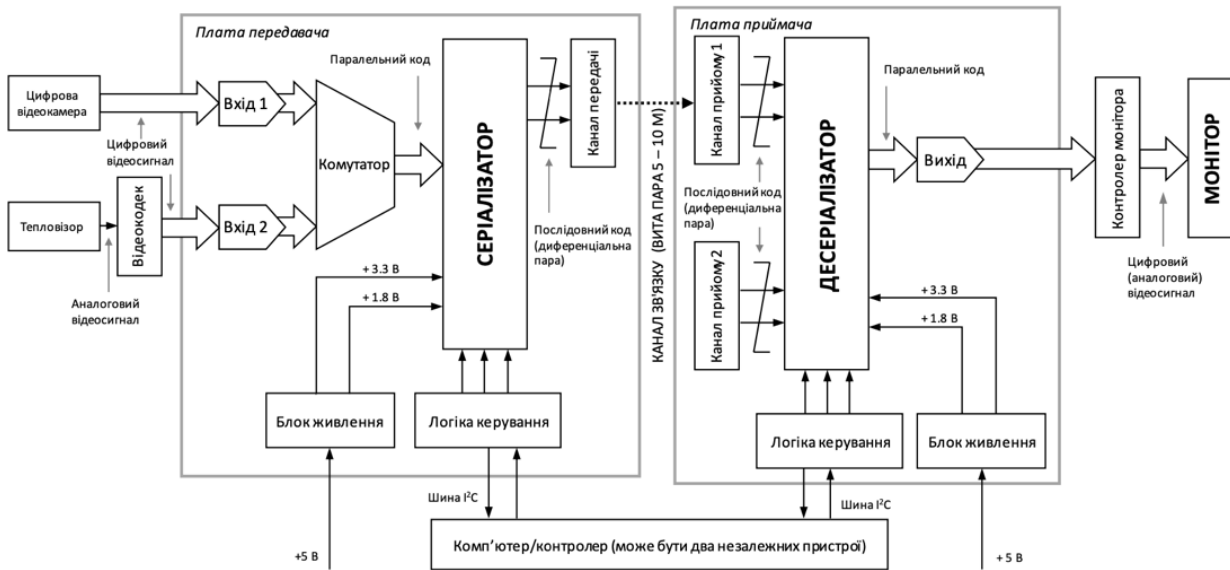


Рис. 6. Структурно-функціональна організація комплексу обробки відеопотоку згідно [9]

- можливість використання системи на мобільних (рухомих зі значним переваженням) платформах;
- можливість розгортання з використанням вбудованих «систем на кристалі».

Виклад основного матеріалу. Архітектура запропонованого рішення з використанням комплексування зображень основних каналів системи та з урахуванням даних додаткових каналів багатоканальної системи для детектування та класифікації об'єктів наведена нижче на рис. 7.

В запропонованому рішенні канали поділяються на візуальні – для отримання даних з відеокамери і тепловізора та додаткові (допоміжні). В якості допоміжних каналів можуть виступати як радіолокаційний (радар), лазерний (лідар), так і канали для збору телеметрії (швидкість, азимут тощо), які пропонується в подальшому використовувати при проведенні аналізу зображень для оптимізації виявлення та класифікації об'єктів.

З метою підвищення інформативності результуючого зображення у порівнянні з кожним окремим зображенням об'єкта, отриманим з візуальних каналів, пропонується використання комплексування зображень. Оскільки система розробляється для мобільних (рухомих платформ), це накладає також додаткові вимоги до конструкції, а використання конструктивного комплексування

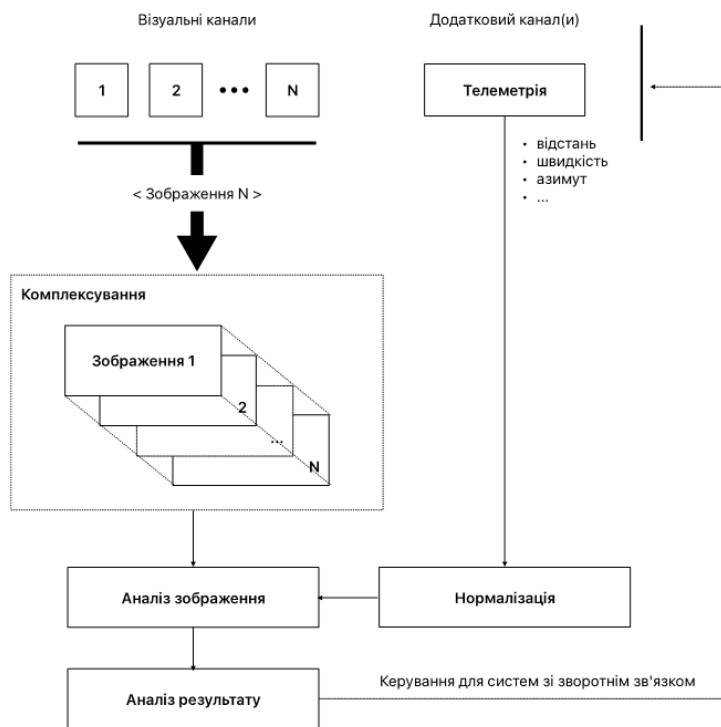


Рис. 7. Архітектура запропонованого рішення

за допомогою суміщення оптичних осей [1] може бути ускладнено динамічними навантаженнями, які в залежності від сфери використання можуть сягати десятків одиниць.

Тому пропонується для виконання блоку комплексування зображень задіяти програмні рішення, в тому числі на основі результатів досліджень, викладених в роботах [2, 3] та реалізованих з використанням вбудованих систем.

Блок аналізу зображень виконує основну функцію по детектуванню та класифікації об'єктів. Для підвищення достовірності цих процедур пропонується використовувати нормалізовані до відповідних характеристик зображень дані з додаткових каналів. Нормалізація параметрів необхідна для синхронізації з даними візуальних каналів (блок нормалізації). Використання додаткових даних дає змогу оптимізувати процедуру детектування, наприклад, дані азимуту на об'єкт дозволяють аналізувати не все зображення, а тільки певну його частину.

Кінцеве рішення приймається в блоці аналізу результату, що пов'язано з можливим отриманням декількох результатів з відповідною достовірністю детектування при аналізі зображень. Кінцеве рішення (результат) використовується для створення коригуючих (управляючих) команд зворотного зв'язку на виконавчі блоки системи. Такий підхід дозволяє своєчасно змінити параметри руху (напрямок, швидкість, висота тощо) мобільної (рухомої) платформи для досягнення кінцевої цілі.

Висновки. У роботі розглянуто принципи структурно-функціональної організації багатоканальних систем детектування і класифікації об'єктів на зображеннях та відеопослідовностях, наведено результати їх порівняльного аналізу, що диктується потребою їх подальшого удосконалення з метою підвищення достовірності детекту-

вання та класифікації. Основними критеріями для порівняння є функціональне призначення окремих каналів системи та послідовність обробки в них потоку даних. Розглянуто ряд відомих підходів щодо структурно-функціональної організації багатоканальних систем та їх реалізації на основі: комплексування зображень каналів, паралельного багатоканального аналізу даних, мультиплексування зображень каналів.

Запропоновано удосконалену архітектуру багатоканальної системи детектування і класифікації та розглянуто особливості її реалізації на мобільних (рухомих) платформах. Встановлено необхідність та актуальність використання програмної реалізації методу комплексування зображень з телевізійного та тепловізійного каналів системи. Запропоновано використання додаткових каналів телеметрії (азимут, швидкість, висота тощо) з метою підвищення достовірності детектування та класифікації об'єктів. При цьому інформація з додаткових каналів використовується як при аналізі зображень, так і при формуванні кінцевого результату та прийнятті рішення щодо корекції курсу слідування рухомої платформи.

Напрямок подальших досліджень є розроблення програмно-апаратних рішень реалізації блоку аналізу багатоканальної системи з використанням додаткових показників даних та проведення його експериментальних досліджень.

Список літератури:

1. Котовський, В. Й., Микитенко В.І. Комплексування зображень в багатоканальних оптико-електронних системах з різноформатними матричними приймачами випромінювання. *Вісті академії інженерних наук України*. 2008. №3 (37). С. 38–44. URL: https://ela.kpi.ua/bitstream/123456789/27035/1/art_55.pdf.
2. Микитенко В.І., Котовський В.Й., Богатирьова Г.В. Багатоканальні іконічні системи дистанційного моніторингу. *Вісті академії інженерних наук України*. 2007. № 2(32). С. 21-26. URL: http://oer.kpi.ua/downloads/nauka/articles/mikit/visti_AIN_2007.pdf.
3. Мамута М.С. Підвищення ефективності комплексування оптико-електронних систем спостереження : дис. ... канд. техн. наук. : 05.11.07. Київ, 2013. 151с. 1 електрон. опт. диск (CD-R).
4. А. П. Гривачевський, С. Є. Фабіровський Суміщення зображень сформованих сенсорами різної фізичної природи в процесі комплексування сигналів у мультиспектральних системах моніторингу. *Радіоелектроніка та телекомунікації*. 2017. № 874. С. 73-80.
5. Method and System for Tracking People in Indoor Environments using a Visible Light Camera and a Low-Frame-Rate Infrared Sensor: пат. US20150324656 США, МПК: G06K 9/46, G06K 9/52, H04N 5/33, H04N 7/18, G01J 5/02, G01J 5/00; заявл. 24.02.2014; опубл. 27.08.2015.
6. Intruder detection using video and infrared data: пат. CA2658347 Канада, МПК: G08B 13/19, G08B 13/196.; заявл. 04.07.2007; опубл. 01.09.2015.
7. Багатоканальний тепловізійно-телевізійний комплекс пошуку-виявлення із завадостійким швидкісним інтерфейсом передачі даних : звіт про НДР (заключний); НТУУ «КПІ ім. І. Сікорського»; кер. д-р техн. наук, проф. Олександр ЛИСЕНКО. Київ, 2020. 160 с. д/б № 2116-п, URL: <https://report.kpi.ua/uk/0118U003751>

Gubar V.G., Lysenko O.M. COMPARATIVE ANALYSIS OF THE STRUCTURAL AND FUNCTIONAL ORGANIZATION OF MULTI-CHANNEL OBJECT DETECTION AND CLASSIFICATION SYSTEMS FOR MOBILE PLATFORMS AND JUSTIFICATION OF THE CHOICE OF THE ARCHITECTURE OF THE DEVELOPED SOLUTION

The work examines the principles of structural and functional organization of multi-channel systems for detecting and classifying objects on images and video sequences and gives the results of their comparative analysis, which is dictated by the need for further improvement to increase the reliability of detection and classification. The main criteria for comparison are the functional purpose of individual channels of the system and the sequence of data flow processing in them. Several well-known approaches to the structural and functional organization of multi-channel systems and their implementation are considered based on the complexation of channel images, parallel multi-channel data analysis, and multiplexing of channel images.

The improved architecture of the multi-channel detection and classification system is proposed, and the peculiarities of its implementation on mobile (moving) platforms are considered. The need and relevance of using the software implementation of the method of integrating images from the system's television and thermal imaging channels has been established. It is proposed to use additional telemetry channels (azimuth, speed, height, etc.) to increase the reliability of object detection and classification. At the same time, information from additional channels is used both in analyzing images and in forming the final result and decision-making regarding the correction of the moving platform's tracking course.

The architecture of such a system is developed taking into account the use in the construction of mobile (moving) platforms. The use of such platforms is possible both in stationary mode when observing and accompanying objects and as platforms for delivering valuable cargo to a given location with the possibility of autopilot with the adjustment of the movement route. The location can be entered using specific characteristics of the object.

Key words: multi-channel system, telemetry, radio channel, laser channel, infrared, thermal imaging, visual, image integration, switch, parallel processing.

Кононова І.В.

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

Дубина В.О.

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

КОМПЛЕКСНЕ ВИКОРИСТАННЯ НАДЛИШКОВОСТІ ДЛЯ ПІДВИЩЕННЯ НАДІЙНОСТІ КОМУНІКАЦІЙНОГО ОБЛАДНАННЯ

Електронні комунікаційні мережі мають вирішальне значення для державного управління у воєнний час і є критично важливими для забезпечення ефективної обороноздатності та координації дій в умовах війни. Підвищення надійності комунікаційного обладнання є ключовим завданням для забезпечення ефективності та стабільності сучасних електронних комунікаційних мереж. Стаття присвячена теоретичному дослідженню процесу функціонування електронної комунікаційної мережі в умовах обмеженої надійності комунікаційного обладнання з метою аналізу сучасних способів резервування при використанні різних видів надлишковості. У статті обґрунтована доцільність комплексного (сумісного) використання різних видів надлишковості для забезпечення необхідних значень показників надійності функціонування комунікаційного обладнання мереж зв'язку. Визначено, що структурне резервування в традиційних його застосуваннях не захищає систему від збоїв, хоча в багатьох випадках потік збоїв у них інтенсивніший, ніж потік відмов; у разі часового резервування враховується характер наслідків відмов об'єкта під час виконання ним своїх завдань; інформаційне резервування існує у вигляді надлишковості та внутрішньої інформаційної мови пристроїв обробки і передачі даних, а також у вигляді надлишковості завадостійких кодів; функціональне резервування дозволяє за рахунок перерозподілу функцій і більш інтенсивної роботи елементу, який виконує до відмови тільки свої основні функції, забезпечити нормальне функціонування об'єкта при виникненні відмов окремих елементів.

З'ясовано, що кожен метод резервування окремо має певні переваги та недоліки, які необхідно враховувати під час вибору та обґрунтування методів підвищення надійності комунікаційного обладнання електронної комунікаційної мережі. Визначено, що ефективність введення надлишковості, як методу підвищення надійності, може бути суттєво підвищена при комплексному використанні різних її видів.

Ключові слова: моделі надійності, комунікаційне обладнання, відмови, збої, резервування.

Постановка проблеми. Забезпечення надійності функціонування складних технічних систем (до яких також відноситься і комунікаційне обладнання (КО) електронних комунікаційних мереж (ЕКМ)) на теперішній час представляє собою єдиний процес, який охоплює всі основні етапи їх життя: проектування, виробництво, випробування та експлуатацію. Ця комплексна проблема включає в себе широке коло наукових, інженерних і економічних аспектів. Її вирішення пов'язано з реалізацією багаточисельних організаційних та технічних, а часто і фундаментальних наукових досліджень, які потребують великих витрат засобів та часу і які відносяться до різних галузей науки і техніки.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Аналіз відомих багаточисельних в наш час теоретичних та прикладних робіт [1–6] в даній предметній галузі показав, що при досягнутих рівнях надійності комплектуючих елементів і якості

проектно-конструктивних та виробничо-технологічних робіт основними шляхами забезпечення необхідної надійності функціонування складних систем є введення різних видів надлишковості при розробці, а також удосконалення принципів і організації технічного обслуговування та ремонту в процесі експлуатації.

Метою роботи є короткий аналіз переваг та недоліків методів резервування при використанні різних видів надлишковості, а також обґрунтування доцільності комплексного (сумісного) їх використання для забезпечення необхідних значень показників надійності функціонування комунікаційного обладнання мереж зв'язку.

Виклад основного матеріалу дослідження. Надамо визначення основних понять, які часто використовуються при дослідженні надійності КО ЕКМ – надлишковість і резервування, наведено в ДСТУ [7].

Надлишковість – додаткові засоби і (або) можливість понад мінімально необхідних для виконання об'єктом заданих функцій.

Залежно від характеру додаткових засобів і можливостей, використовуваних для забезпечення надійності, на даний час розрізняють п'ять видів надлишковості: структурну, часову, інформаційну, функціональну та навантажувальну. Вид використуваної надлишковості визначає метод резервування.

Резервування – метод забезпечення надійності об'єкта завдяки використанню додаткових засобів і (або) можливостей, надлишкових щодо мінімально необхідних для виконання необхідних функцій.

Структурне резервування – резервування із застосуванням резервних елементів структури об'єкта.

Часове резервування – резервування із застосуванням резервів часу.

Інформаційне резервування – резервування із застосуванням резервів інформації.

Функціональне резервування – резервування, при якому використовується здатність елементів об'єкта виконувати додаткові функції.

Навантажувальне резервування – резервування, при якому використовується здатність елементів об'єкта сприймати додаткові навантаження понад номінальних.

Надамо коротку характеристику вказаним вище методам резервування.

Структурне резервування передбачає використання резервних елементів, що входять у фізичну структуру об'єкта. Цей вид резервування найвідоміший, досить добре досліджений і широко використовується на практиці для підвищення надійності. Методи структурного резервування вирізняються універсальністю і дають змогу створювати з ненадійних елементів системи з необхідним рівнем надійності. Водночас у багатьох випадках схемна реалізація цих методів пов'язана з низкою труднощів. Зокрема, структурне резервування заміщення вимагає певного часу на перемикання резерву, причому перемикачі в деяких випадках виявляються не дуже простими і надійними. Тому надійність системи знижується через можливі відмови перемикачів і несвоєчасне їхнє спрацювання. Крім того, резервними елементами можна скористатися тільки після виявлення відмови основного елемента, перевірки технічного стану резервного і формування команди на перемикання. Це означає, що для ефективного застосування структурного резерву має бути створена розвинена система контролю з високими показниками повноти та достовірності функціонування. Погіршення характеристик контролю

спричиняє зниження ефективності структурного резервування, а досягнення необхідних характеристик потребує певних витрат обладнання і часу. А це, своєю чергою, знижує надійність резервованої системи.

У системах обробки і передачі інформації, що входять до складу КО ЕКМ, крім відновлення працездатності шляхом перемикання на резервні елементи, потрібно проводити також інформаційне відновлення, на яке часто витрачаються значні ресурси обладнання і часу. При цьому ефективність саме інформаційного відновлення визначає, як правило, ефективність структурного резервування. Є ще два фактори, що впливають на надійність таких систем, зокрема, на надійність інформаційних обчислювальних систем: наявність збоїв і знецінення частини роботи внаслідок відмов і збоїв. Структурне резервування в традиційних його застосуваннях не захищає систему від збоїв, хоча в багатьох випадках потік збоїв у них інтенсивніший, ніж потік відмов. Знецінення частини роботи під час відмов і збоїв у багатьох випадках відбувається раніше, ніж вступає в дію структурне резервування. Тому відмова системи може виникнути раніше, ніж буде використана структурна надлишковість.

З вищесказаного випливає, що використання загальнотехнічних схем структурного резервування спричиняє в низці випадків серйозні труднощі. Одним з ефективних шляхів подолання цих труднощів є спільне використання структурної надлишковості з розробкою спеціальних засобів системного програмного забезпечення.

Навантажувальне резервування засновано на здатності елементів об'єкта виконувати свої функції при додаткових навантаженнях понад мінімальних. Можна говорити про наявність навантажувального резервування в об'єктах зі структурною надлишковістю, якщо режим роботи деякої частини або всіх елементів структурного резерву полегшується з метою підвищення їхньої безвідмовності та економії ресурсу. При цьому створюється запас щодо навантаження, при якому інтенсивність відмов окремого резервного елемента λ_p менша, ніж інтенсивність відмов λ окремого основного елемента, що працює в номінальному (навантаженому) режимі. У цьому разі для характеристики навантажувального резервування може бути використано коефіцієнт навантаження резервного елемента, $\alpha = \lambda_p / \lambda$, який може набувати значень від 0 до 1. Саме в такому значенні слід розуміти навантажувальне резервування, яке ми використовуватимемо надалі під час роз-

гляду об'єктів зі структурним і навантажувальним резервуванням. Основним недоліком цього методу резервування є збільшення часу переведення працездатного резервного елемента з ненавантаженого (при $\alpha=0$) або полегшеного режиму (при $0<\alpha<1$) в робочому режимі і підключенням його замість основного елемента, що відмовив.

Часове резервування представляє собою метод забезпечення нормального функціонування об'єктів, що виконують певні завдання в умовах впливу різних збурень (відмов, збоїв, завод, тощо), шляхом призначення та використання резервного (надлишкового) часу [8]. На відміну від інших видів надлишковості тут резервом є час. Цей резерв вноситься не в об'єкт, як, наприклад, у разі структурного резервування, а в порядок (алгоритм) використання (застосування) об'єкта.

У разі часового резервування враховується характер наслідків відмов об'єкта під час виконання ним своїх завдань. У класичній теорії надійності оцінка показників надійності зводиться до вивчення перебування об'єкта в підмножині працездатних станів на деякому інтервалі часу. Однак у реальних ситуаціях за певних вимог до часу відновлення працездатності об'єкта наслідки відмови можуть бути усунені та не впливати на виконання об'єктом своїх функцій.

Особливість зазначеного підходу до аналізу та забезпечення надійності складних технічних об'єктів полягає у «зважуванні» відмов за важливістю та ознакою витрачання часу на усунення їх наслідків. Це дає змогу розкрити й використати для підвищення надійності функціонування об'єктів внутрішні резерви (зокрема, часові), закладені в самих об'єктах і їх алгоритмах використання за призначенням.

До переваг такого підходу можна віднести наступне:

1) поліпшення показників надійності функціонування об'єкта часто не пов'язано зі збільшенням об'єму обладнання та витрачанням додаткових коштів, а ґрунтується на запровадженні або використанні наявних в об'єктах резервів часу;

2) урахування резерву часу дає змогу відобразити дійсну надійність, тобто дає змогу більш об'єктивно оцінити можливості систем нормально функціонувати в умовах впливу різних дестабілізуючих факторів. Саме наявністю резерву часу можна в багатьох випадках пояснити, чому об'єкти виконують свої функції успішніше, ніж це впливає з показника безвідмовності обладнання;

3) глибше проникнення в сутність досліджуваних процесів функціонування дає змогу виявити

і обґрунтувати нові, ефективні методи забезпечення надійності складних технічних об'єктів у реальних умовах експлуатації.

В загальному випадку структурна схема надійності об'єкта з часовим резервуванням може бути представлена у вигляді умовної системи об'єкт-час (системи ОЧ), яка включає в себе два загальні елементи: вихідний резервуючий об'єкт та резерв часу (рис. 1).

Така схема аналогічна схемі ненавантаженого дублювання обладнання, так як після відмови об'єкта починає діяти («вмикається») резерв часу. Відмова системи ОЧ (в подальшому – просто системи) виникає в момент витрачання резерву часу.

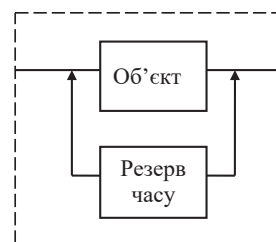


Рис. 1. Структурна схема надійності системи з часовим резервуванням (системи ОЧ)

Елементи, зображені на рис. 1, названі загальними, оскільки кожний з них може бути класифікований за низкою ознак. Зокрема, в об'єкті можуть бути реалізовані різні методи резервування, наприклад, структурного та навантажувального.

В об'єкті можуть виникати відмови двох типів, які відрізняються за наслідками: незнецінюючі і знецінюючі попереднє напрацювання. Незнецінюючі відмови викликають лише затримку виконання завдання на час відновлення працездатності об'єкта, але не призводять до повторення попереднього напрацювання. При знецінюючих відмовах після відновлення працездатності об'єкт приступає до повного або часткового повторення знеціненого напрацювання.

Методи створення часової надлишковості побудовані на різних джерелах резервного часу. До них належать: запас продуктивності системи, що створює різницю між оперативним часом виконання завдання і фактичним часом; комплексування пристроїв однакового призначення; створення внутрішніх запасів продукції в накопичувачах; функціональна інерційність, яку спричиняють фізико-технічні процеси в об'єкті; спосіб завантаження об'єкта, а також інші способи, які призводять до виникнення у об'єкта або окремих його пристроїв надлишкового часу, яке може

бути використано для відновлення працездатного стану об'єкта, виявлення і локалізації відмов, реконфігурації технічної структури, повторення знецінених робіт, інформаційного відновлення, підключення структурного резерву тощо.

Надійність систем із часовим резервуванням оцінюють за результатами виконання встановлених часових обмежень до всієї траєкторії функціонування об'єкта або за результатами виконання деякого завдання. Виконання завдання – це подія, що полягає в завершенні заданого обсягу робіт зі встановленими обмеженнями на час виконання всіх робіт і окремих етапів та встановленими вимогами до якості і ритмічності роботи системи. Порушення встановлених вимог та обмежень призводить до зриву виконання завдання і розглядається як відмова (зрив функціонування) системи.

Таким чином, для системи з часовим резервуванням порушення працездатності об'єкта не обов'язково супроводжується відмовою системи навіть при послідовному з'єднанні елементів, оскільки є можливість відновити працездатність об'єкта за резервний час.

Відмова системи з часовим резервуванням (зрив функціонування або зрив виконання завдання) – це подія, що полягає в порушенні працездатності об'єкта, яка має недопустимі наслідки або не може бути усунута за допустимий (резервний) час [9]. На основі цього загального визначення для кожного конкретного випадку використання резервного часу необхідно формулювати свої критерії відмови системи.

Таким чином, систему з часовим резервуванням (систему ОВ) можна розглядати як своєрідний перетворювач потоку відмов: вхідним є потік відмов об'єкта, а вихідним – потік відмов системи (рис. 1). За рахунок дії резерву часу вихідний потік системи містить у середньому меншу кількість відмов за одиницю часу, ніж вхідний потік, – відбувається розрідження вихідного потоку відмов. Ефект розрідження проявляється тим сильніше, чим більше виділяється і використовується резервного часу.

Аналіз результатів теоретичного дослідження окремих видів резервування, зокрема, структурного та часового, показав, що їм притаманна певна спільність [10]. Це дає можливість з деякими обмовками поширити існуючу класифікацію структурного резервування на часове резервування. Водночас, частина ознак класифікації специфічна тільки для часового резервування.

За способом поповнення розрізняють непоповнюваний, поповнюваний і комбінований резерв

часу. Непоповнюваний резерв часу t_p встановлюється заздалегідь, до початку роботи, і не зростає при виконанні завдання. При працездатному стані всіх елементів об'єкта поточне значення резерву не змінюється, а при відмовах може зменшуватися стрибкоподібно або у лінійній в залежності від часу при відновленні працездатності об'єкта.

Поповнюваний резерв часу t_d зростає за деяким законом у разі працездатного стану системи, а також у разі відновлення працездатності деяких елементів, що відмовили. Миттєво поповнюваний резерв поновлюється до вихідного рівня стрибком відразу ж після закінчення ремонту.

В одній і тій самій системі можуть бути обидва види резерву часу. У такому випадку його називають комбінованим резервом часу, причому поповнювана і непоповнювана складові загального резерву можуть певним чином між собою взаємодіяти.

Основним недоліком методів часового резервування є те, що покращення надійності функціонування супроводжується погіршенням деяких інших характеристик системи, зокрема, зменшенням реальної продуктивності, погіршенням точності, ускладненням алгоритмів функціонування, підвищенням вимог до обладнання контролю працездатності та пошуку дефектів, системи технічного обслуговування і ремонту.

Інформаційне резервування реалізується з застосуванням резервів інформації і широко використовується в сучасних автоматичних та автоматизованих системах управління, інформаційно-обчислювальних, інформаційно-вимірювальних та інших комплексах, пов'язаних з обробкою і передачею великих обсягів інформації. Існують різні способи введення та використання інформаційної надлишковості [11]. Зокрема, вона існує у вигляді надлишковості та внутрішньої інформаційної мови пристроїв обробки і передачі даних, а також у вигляді надлишковості завадостійких кодів; її вводять у масив вихідних даних і в структуру пам'яті КО.

Інформаційну надлишковість використовують для забезпечення достовірності даних, які найбільшою мірою впливають на нормальне функціонування комплексу програм і потребують значного часу для відновлення (для відновлення таких даних потрібне їхнє тривале накопичення та обробка). Інформаційне резервування сприяє не тільки виявленню спотворення даних, а й усуненню помилок і підвищенню точності обчислень. Дані захищають дво- і трикратним резервуванням з відповідною дисципліною контролю збереження та періодичним оновленням.

Таким чином, введення інформаційної надлишковості спрямоване на забезпечення нормального функціонування складної інформаційно-обчислювальної техніки в умовах впливу відмов і збоїв обладнання, спотворення інформації та інших агресивних чинників.

Крім того, використання інформаційного резервування в багатьох випадках сприяє підвищенню ефективності інших видів резервування: структурного, часового і функціонального.

Основними недоліками інформаційного резервування можна вважати ускладнення обладнання та алгоритмів функціонування, зниження продуктивності систем оброблення та передавання даних, а також збільшення вартості.

При функціональному резервуванні функції елемента, що відмовив, передаються іншому елементу об'єкта для якого вони не зовсім властиві. Однак надлишковість щодо виконуваних функцій, наявні в підмінюваному елементі, дає йому можливість одночасно (паралельно) виконувати протягом деякого допустимого часу свої та чужі функції з деяким погіршенням (в допустимих межах) виконуваної роботи. Отже, за рахунок перерозподілу функцій і більш інтенсивної роботи елемента, який виконує до відмови тільки свої основні функції, вдається забезпечити нормальне функціонування об'єкта при виникненні відмов окремих елементів. При цьому функціональний резерв є засобом, що забезпечує наявність у підмінюваного відмовившого елемента резерв часу, який використовується для відновлення його працездатності.

Зазвичай функціональний резерв існує і використовується в складних просторово рознесених системах за рахунок структурного і функціонального ускладнення і зв'язків між її елементами, а також шляхом раціональної організації застосування таких систем. Складнощі практичної реалізації функціонального резервування пов'язані з необхідністю у раді випадків додаткового перетворення формі інформації, погіршенням її точності та достовірності, зниженням пропускну здатності.

Проведений вище стислий аналіз показав, що кожен метод резервування окремо має певні переваги та недоліки, які необхідно враховувати під час вибору та обґрунтування методів підвищення надійності. Водночас дослідження показали

[8–11], що ефективність введення надлишковості, як методу підвищення надійності, може бути суттєво підвищена при комплексному використанні різних її видів. Об'єктивна можливість і доцільність практичної реалізації принципу комплексного використання надлишковості обумовлена такими причинами:

у багатьох технічних об'єктах реально існують різні види надлишковості, передбачені при проєктуванні і які володіють не тільки окремими, але і загальними властивостями щодо впливу на надійність; тому вивчення надлишковості, її видів, способів введення та використання, її ролі та місця в загальній програмі забезпечення надійності має проводитися комплексно з єдиних методологічних позицій;

у багатьох випадках один вид надлишковості (наприклад, структурна, інформаційна або навантажувальна) може слугувати засобом, що забезпечує наявність у системі іншого виду надлишковості (наприклад, часової);

спільне використання різних видів надлишковості дає можливість частково компенсувати недоліки, притаманні окремим видам, та посилити їх переваги, тобто такий шлях призводить до нових якісних і кількісних результатів, отримати які при іншому підході не вдається;

у разі комплексного використання надлишковості створюються найкращі умови для підвищення всіх основних показників надійності завдяки покращенню відновлюваності системи; а саме скорочення часу відновлення є тим головним чинником, який безпосередньо забезпечує ефективність усіх методів резервування.

Висновки. Проведений аналіз показав, що при практичній реалізації принципу комплексного використання надлишковості сумарний виграш у надійності не є простою сумою виграшів від використання кожного методу резервування окремо, а набагато більший. Наскільки більше – це залежить від кількості спільно використовуваних видів надлишковості та кратності резервування. Подальші дослідження будуть спрямовані на побудову моделей оцінки надійності об'єктів КО ЕКМ при сумісному використанні структурного, навантажувального і часового резервування, що містить поповнювальну і непоповнювальну складові резервного часу.

Список літератури:

1. Tandon N. , Patel N. An efficient implementation of multichannel transceiver for manet multinet environment. *10th IEEE Intern. Conf. Computing, Communication and Networking Technologies (ICCCNT)*, 2019. P. 1–6. DOI: 10.1109/ICCCNT45670.2019.8944505.

2. Wentao Z., Mathaios P., Milanovic J. Reliability and vulnerability assessment of interconnected ict and power networks using complex network theory. *IEEE Power & Energy Society General Meeting*. 2018. P. 78–85. DOI: 10.1109/PESGM.2018.8586596.
3. Rafiee P., Latif Shabgahi G. Evaluating the reliability of communication networks (WAN) using their fuzzy fault tree analysis – a case study. *The Journal of Mathematics and Computer Science*, 2011. P. 262–270. DOI: 10.22436/jmcs.002.02.06.
4. Князева Н.О., Колумба І.В. Використання базових структурних характеристик мережі невизначеної топології для оцінки її структурної надійності. *Системи управління, навігації та зв'язку*. 2018. С. 130–134. URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/suntz_2018_6_27.
5. Лемешко О.В. Потоківі моделі та методи маршрутизації в інфокомунікаційних мережах: відмовостійкість, безпека, масштабованість: посібник / О.В. Лемешко, О.С. Єременко, О.С. Невзорова, Харків, 2020. С. 308.
6. Сенів М., Роїк О. Засоби розрахунку показників надійності програмного забезпечення на підставі моделі з урахуванням недосконалого відлагодження. *Науковий вісник НЛТУ України*. 2021. Т. 31, № 6. С. 87–91. DOI:10.36930/40310613.
7. ДСТУ 2860–94: Надійність техніки. Терміни та визначення. Чинний від 1996–01–01. *Держстандарт України*. 1994. С. 90. URL: http://www.ksv.biz.ua/publ/dstu/dstu_2470_94/3-1-0-196.
8. Ahmed, N. O., Bhargava, B. From Byzantine Fault-Tolerance to Fault-Avoidance: An Architectural Transformation to Attack and Failure Resiliency. *IEEE Transactions on Cloud Computing*. 2020. No. 8(3), P. 847–860. DOI: <https://doi.org/10.1109/TCC.2018.2814989>.
9. Єременко О.С., Мерсні А. Підвищення відмовостійкості елементів сучасних інфокомунікаційних мереж із застосуванням протоколів резервування шлюзу за замовчуванням. *Проблеми телекомунікацій*. 2020. № 2(27). С. 68–81. DOI: <https://doi.org/10.30837/pt.2020.2.06>
10. Mogylyevych D., Kononova I., Kredentser B., Karadschow I. Comprehensive Reliability Assessment Technique of Telecommunication Networks Equipment with Reducible Structure. *Вісник НТУУ «КПІ». Серія Радіотехніка, Радіоапаратобудування*. 2020. № 80. С. 39 – 47. DOI: <https://doi.org/10.20535/RADAP.2020.80.39-47>.
11. Mogylyevych D., Kononova I. Improved Estimates for the Reliability Indicators of Information and Communication Network Objects with Limited Source Information. *Advances in Information and Communication Technologies. UKRMICO 2018. Lecture Notes in Electrical Engineering*. Springer. 2018. P. 101–117. DOI: 10.1007/978-3-030-16770-7_5.

Kononova I.V., Dubyna V.O. INTEGRATED USE OF REDUNDANCY TO IMPROVE THE RELIABILITY OF COMMUNICATIONS EQUIPMENT

Electronic communications networks are crucial for wartime governance and are critical to ensuring effective defense capabilities and coordination in wartime. Improving the reliability of communication equipment is a key task to ensure the efficiency and stability of modern electronic communication networks. The article is devoted to a theoretical study of the process of functioning of an electronic communication network under conditions of limited reliability of communication equipment with a view to analyzing modern methods of redundancy using various types of redundancy. The article substantiates the expediency of the integrated (joint) use of various types of redundancy to ensure the required values of the reliability indicators of the communication equipment of communication networks. It has been determined that structural redundancy in its traditional applications does not protect the system from failures, although in many cases the flow of failures is more intense than the flow of failures; in the case of time redundancy, the nature of the consequences of object failures during the performance of its tasks is taken into account; information redundancy exists in the form of redundancy and internal information language of data processing and transmission devices, as well as in the form of redundancy of noise immune codes; functional redundancy allows for the redistribution of functions and more integrated use of communication equipment.

It has been found that each redundancy method individually has certain advantages and disadvantages that should be taken into account when selecting and justifying methods for improving the reliability of communication equipment of an electronic communication network. It is determined that the effectiveness of introducing redundancy as a method of improving reliability can be significantly increased by the integrated use of its various types.

Key words: reliability models, communication equipment, failures, failures, redundancy.

Могилевич Д.І.

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

Хміль Р.В.

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

АНАЛІЗ МЕТОДІВ РОЗПІЗНАВАННЯ ОБРАЗІВ НА ОСНОВІ НЕЙРОННИХ МЕРЕЖ

Сучасне суспільство знаходиться у постійному інформаційному русі, що пришвидшує його діджиталізацію та актуалізує питання використання штучного інтелекту в усіх секторах економіки. Підвищена конкуренція на усіх рівнях вимагає впровадження інновацій, засвоєння результатів наукового прогресу та його активного використання у побуті. Все більшої уваги потребують методи розпізнавання образів на основі нейронних мереж, а також інструментарій реалізації нейромоделювання. В процесі написання статті нами використовувалися методи аналізу, синтезу, індукції, дедукції та логічного узагальнення. У дослідженні визначено еволюцію формування та розвитку нейронних мереж та окреслено його тісний зв'язок з біологічним інтелектом. З'ясовано, що штучні нейронні мережі, засновані на біологічних аналогах. З використанням математичних моделей подібно до нервових клітин числові або якісні показники формують вхідні та вихідні масиви даних, яким властиві емерджентна та синергетична функції. Виділено види нейронних мереж, які відрізняються одне від одного наявністю певної кількості шарів штучних вузлів. Обґрунтовано, що нейронні мережі відрізняються здатністю до самостійного навчання або навчання з вчителем. Зауважено, що використання нейронних мереж для розпізнавання об'єктів має значні переваги відносно інших методів. Залучені нейронні мережі являють собою систему технологічного зору спостереження за відеоінформацією, зображенням, картою, образом та є найбільш інноваційним напрямом сучасної електроніки. З'ясовано, що розпізнавання образів на основі нейронних мереж можливе у таких секторах, як: економіка, фінанси, охорона здоров'я, фармацевтика, правоохоронна діяльність, автомобільна та аерокосмічна промисловість, виробництво інноваційних продуктів. Визначено перспективи подальших досліджень, зокрема – практичне використання інструментарію нейромоделювання для діагностики образів.

Ключові слова: штучний інтелект, нейронні мережі, перцептрон, біологічний інтелект, нейромоделювання.

Постановка проблеми. Необхідність інноваційного розвитку та стимулювання науково-технічного прогресу вимагає від вітчизняної промисловості та усіх секторів економіки пришвидшення технологічної діджиталізації. Використання штучного інтелекту за таких умов дозволить у зручний спосіб та з мінімальними ресурсовитратами вирішити проблему розпізнавання об'єктів, здійснити аналіз діяльності складних господарських систем та вчасно прийняти вірні управлінські рішення на основі одержаних результатів нейромоделювання.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Проблематика розпізнавання образів на основі нейронних мереж досліджена у наукових працях багатьох вітчизняних та закордонних вчених.

Лебідь О., Кіпоренко С., Вовк В. здійснено аналіз методів машинного навчання та нейроме-

режевих технологій, які використовуються для виявлення аномалій. Вченими доведено доцільність використання нейромережевих технологій у системах інформаційної безпеки та розроблено метод вирішення цього завдання на основі архітектурних нейромереж. Отримані висновки свідчать про можливість використання штучного інтелекту для виявлення програмно-технічних впливів на критичні системи інформаційної інфраструктури в умовах кібервійни у масштабі часу, близькому до реального з високим рівнем достовірності [1].

Мясіщев О., Ленков Є., Білик О. глибинно вивчили алгоритми та інструменти розпізнавання об'єктів з використанням нейронних мереж. Корисним для нашого дослідження є класифікація штучних мереж, з використанням яких доцільно проводити діагностику об'єктів на основі фор-

мування образу-еталону [2]. Мірошник О. запропонував для розпізнавання вейвлет-образів несинусоїдальних сигналів на базі адаптивної резонансної теорії використовувати нейронну мережу. Вчений розробив програмний продукт, в якому закладено алгоритм роботи нейронної мережі та описані його основні функціональні можливості [3].

Мозговенко А., Зінов'єва О. визначили основні підходи до вирішення завдань діагностики «комп'ютерного зору», з акцентом на глибинне машинне навчання та штучні нейронні мережі. Авторами розглянуто алгоритми розпізнавання об'єктів, проведено аналіз методів, що застосовуються при обробці зображень, а також описано використання засобів машинного навчання при роботі із малюнками [4].

Димо О., Морозова Г. запропонували використання нейронної мережі Кохонена у проектах розпізнавання рекламних текстів, а також визначили інструментарій фільтрації небажаної інформації [5].

Мірошник О., Святобатько А. запропонували спосіб прогнозування фізичних параметрів з використанням нейронних мереж. Авторами наведені математичні вирази для наглядного розуміння структури нейронних мереж та їх роботи. Результати досліджень будуть корисними для застосування в різних галузях для вирішення задач прогнозування параметрів технічних систем та агрегатів, а також для запобігання виникнення аварійних ситуацій [6].

Пелешак Р., Літвін В., Черняк О., Пелешак І., Дорошенко М. з використанням методу Хаусхолдера створили архітектуру стохастичної псевдоспінової нейронної мережі з діагональними синаптичними зв'язками без втрати взаємодії між усіма нейронами в шарі, щоб скоротити час її навчання. У залежності від напрямку псевдоспінових нейронів авторами запропоновано класифікацію ренормованої нейронної мережі з феромагнітною, антиферомагнітною структурами та дипольним склом [7].

О. Gencoglu, Т. Virtanen та Н. Hattunen дослідили проблеми класифікації аудіо сигналів та розпізнавання акустичних подій за допомогою глибинних нейромереж [12].

Зазначені наукові дослідження демонструють підвищену увагу вчених до проблематики методів розпізнавання образів на основі нейронних мереж. Однак враховуючи пришвидшений темп діджиталізації суспільства та науки існує потреба безперервного дослідження методів розпізнавання образів на основі нейронних мереж.

Метою роботи є теоретичний аналіз існуючих методів та інструментів розпізнавання образів на основі нейронних мереж.

Виклад основного матеріалу дослідження. В останні роки стрімко зростає науковий інтерес до вивчення технології роботи штучного інтелекту, однак реалізація його інструментів на практиці залишається складним питанням. Суб'єкти підприємницької діяльності, державні установи, вчені або інші стейкхолдери ринку, які потребують залучення штучного інтелекту в свої практичні або наукові дослідження часто стикаються з нерозумінням етапності його реалізації. Хоча саме штучний інтелект за рахунок ряду переваг, про які буде йтися у подальшому, здатні вчасно на ранніх стадіях діагностувати причини незадовільного стану підприємства, попередити банкрутство, а для вчених – у зручний спосіб провести аналіз «розпорошеного» масиву статистичних даних.

Модель штучного нейрону була запропонована Уореном МакКаллоком (Warren McCulloch) та Уолтером Пітсом (Walter Pitts) в 1943 році. В якості основи для своєї моделі автори використали біологічний нейрон. Штучний нейрон МакКаллока-Пітса має N вхідних бінарних величин x_1, \dots, x_n , котрі трактуються як імпульси, що надходять на вхід нейрону (рис. 1). В нейроні імпульси агрегуються з вагами w_1, \dots, w_n .

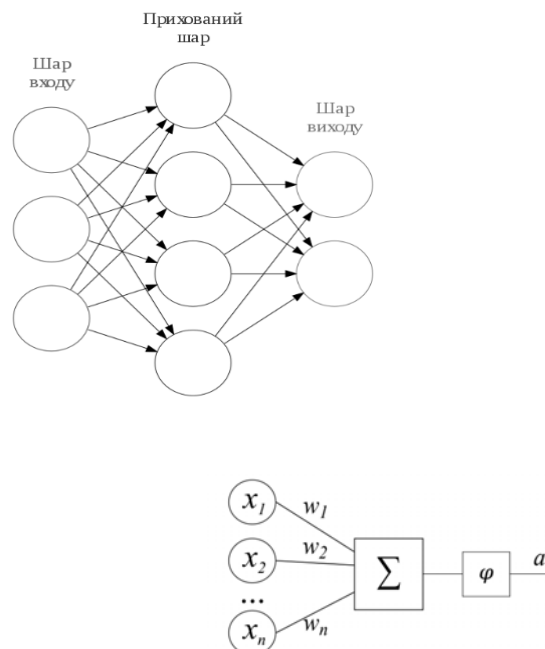


Рис. 1. Модель штучного нейрону МакКаллока-Пітса

Вихідний сигнал нейрону визначається за формулою: $a = \varphi\left(\sum_{i=1}^n w_i x_i\right)$, де нелінійна функція перетворює сумарний імпульс у вихідне значення

нейрону. В моделі МакКаллока-Пітса для цієї мети використовувалась функція Хевісайда.

МакКаллок та Пітс запропонували також метод об'єднання окремих нейронів у штучні нейронні мережі. Для цього вихідні сигнали нейрону передаються на вхід наступному нейрону. Нейронна мережа може складатись з декількох шарів, на кожному з яких знаходиться декілька нейронів. Шар, який приймає сигнали з зовнішнього світу, називається вхідним. Шар, який видає сигнали у зовнішній світ, - вихідним. Інші шари називаються прихованими. Штучні нейронні мережі, задані таким чином, здатні наблизити будь-яку неперервну функцію з будь-якою потрібною точністю.

У науковому світі першою простою нейронною мережею слугував перцептрон, розроблений Ф. Розенблатом у кінці 50-х років 20 ст. Він вміщував єдиний нейрон та характеризувався як лінійна регресійна функція з сигмоподібною активацією. Це було поштовхом для розробки дедалі складніших нейронних мереж, що призвело у подальшому до винаходу глибинних мереж, які можуть містити велику кількість шарів.

За визначенням Дзензури О., Луньової М. штучна нейронна мережа – це частина обчислювальної системи, призначена для імітації того, як людський мозок аналізує та обробляє інформацію. Така мережа може бути використана як фільтр та автоасоціативна пам'ять, тобто така, яка може завершити чи виправити образ, але не може асоціювати отриманий образ іншим образом. Не досить розповсюдженою є нейромережа Гопфілда. Проте вона на відміну від багатьох нейронних мереж, що працюють до отримання відповіді через певну кількість тактів, працює до досягнення рівноваги, коли наступний стан мережі дорівнює попередньому [8].

За нашим баченням, нейронні мережі – один з інструментів реалізації штучного інтелекту, які мають складну багаторівневу архітектуру. Першоджерелом походження штучного інтелекту є біологічний інтелект. Зокрема нервові клітини мозку або нейрони посилають, ретранслюють і приймають електричні сигнали. Штучні нейронні мережі, засновані на зазначених біологічних аналогах. З використанням математичних моделей подібно до нервових клітин числові або якісні показники формують вхідні та вихідні масиви даних, яким властиві емерджентна та синергетична функції. Такі упорядковані математичні моделі є основою алгоритмів глибокого навчання та дозволяють обчислювальній машині вчитися на прикладі вхідних даних в різних комп'ютерних

програмах або додатках, починаючи від розробки безпілотних літальних пристроїв і закінчуючи автоматизованим обслуговуванням споживачів у банківському секторі.

У біологічному організмі постійно утворюються нові нейронні ланцюги або алгоритми аналізу великої кількості даних але наше розуміння нейронних мереж неглибокі. Коли вони працюють у нашому мозку, ми не можемо спостерігати архітектуру їх навчання. У разі зниження нейронних процесів у мозку, ми часто не знаємо, як це самотужки виправити. З використанням обчислювальних машин, навпаки, ми можемо спостерігати, навчати та прогнозувати кінцевий результат формування нейронних ансамблів і алгоритмів, за допомогою яких нейронні мережі навчаються.

У науковій думці присвяченій нейронним мережам обговорюється багато питань, які, допомагають зацікавленим стейкхолдерам використовувати їх у поточній роботі. Зокрема особливо актуальними питаннями є такі: яким чином формується структура окремих нейронів і мереж під час роботи штучного інтелекту; які інструменти і правила використовуються під час навчання штучної мережі; чи з'являються підмережі, які утворюють символічні маніпуляції тощо. Проте у будь-якому випадку, користь застосування штучних нейронних мереж характеризується їх здатністю ефективно узагальнювати складні явища, спостерігати закономірності вхідних даних.

Дашкевич А. справедливо зазначив, що для багатьох задач розпізнавання цифрових зображень особливо важливими для якості процесу класифікації постають етапи початкової обробки зображень (зменшення шумів, збільшення різкості) та виділення ознак з підготовлених зображень. Існуючі алгоритми обробки та виділення ознак є досить витратними за кількістю обчислень, тому постає задача більш точного та/або менш витратного з точки зору комп'ютерних ресурсів, виділення ознак з графічних зображень [9, с. 134].

За визначенням Клещ Д., Федорченко В. стандартні завдання, які вирішують нейронні мережі у додатку до зображень є такі: ідентифікація об'єктів; розпізнавання частин об'єктів; семантичне визначення меж об'єктів (дозволяє залишати тільки межі об'єктів на картинці); семантична сегментація (дозволяє розділяти зображення на різні окремі об'єкти); виділення нормалей до поверхні (дозволяє перетворювати двовимірні картинки на тривимірні зображення); виділення об'єктів уваги (дозволяє визначити те, на що звернула б увагу людина на цьому зображенні). Варто зазначити, що

завдання розпізнавання зображень має яскравий характер, розв'язання цього завдання є складним та неординарним процесом. При виконанні розпізнавання як об'єкта може бути людська особа, техніка, а також безліч інших об'єктів, що характеризуються низкою унікальних ознак, що суттєво ускладнює процес ідентифікації [10, с. 97].

Варто зазначити, що для розпізнавання образів використовують чисельні види нейронних мереж. Як приклад багатосарові нейронні мережі, які відрізняються від інших наявністю більше одного шару штучних вузлів. Досить розповсюдженою для розпізнавання образів є нейронна мережа вищого порядку, що містить лише один шар. Вона швидко та легко навчається, на відміну від багатосарових нейронних мереж. Для аналізу економічних, демографічних, фінансових процесів часто використовується мережа Гопфілда та самоорганізуючі нейронні карти Кохонена.

Нейронні мережі можна класифікувати за багатьма параметрами. Наприклад, за характером навчання. Найбільш просунутими є глибинні та згорткові нейромережі. Глибинні нейромережі складаються із декількох прихованих шарів (рис. 1). Згорткова нейронна мережа має спеціальну архітектуру, що дозволяє їй максимально ефективно розпізнавати образи. Ідея такої нейромережі базується на чередуванні згорткових та субдискретизуючих шарів, а структура є однонаправленою. Незважаючи на те, що модель штучних нейронних мереж була запропонована ще в 1943 році, термін глибоке навчання (deep learning) став широко використовуватись лише з 2006 року. До цього використовувались такі терміни як загрузка глибинних мереж (loading deep networks) та навчання глибинної пам'яті (learning deep memories).

Якість розпізнавання образів нейронними мережами залежить від ефективності проведеного навчання на прикладі певної вибірки даних з отриманням значної кількості навчальних пар. За результатами навчання нейронної мережі визначається функціонал помилки або відхилення, які корегуються методикою градієнтного спуску. Процес навчання нейронної мережі направлений на усунення помилки, що дозволяє штучному інтелекту самостійно корегувати показники допустимих вагів між нейронами.

Нейронні мережі відрізняються здатністю до самостійного навчання або навчання з вчителем. Неможливо достеменно відзначити, який вид навчання є більш доцільним. Зокрема різні об'єкти, явища або тенденції можна обробляти

як нейронною мережею навченою вчителем, або за його відсутності. Навчання мережі з вчителем обов'язково відбувається за втручання зовнішнього стейкхолдера, який володіє інформацією щодо об'єкту аналізу та оцінює вхідний та вихідний вектор. Важливим є втручання вчителя у навчання нейронної мережі таким чином, щоб у кінцевому результаті мережа корегувала власні параметри, які надходять ззовні з урахуванням сигналів помилок.

Таким чином, штучна мережа імітує поведінку, яку їй подає стейкхолдер, прилаштовує свої параметри до дій вчителя, що на виході надає можливість отримати бажаний результат нейромодельовання. Після процесу навчання штучної мережі, обов'язковим є необхідність усунення вчителя від навчання та надання можливості мережі самостійно за установчими даними налагодити алгоритм дій. У разі мінімальної помилки нейронної мережі, можна вважати, що вона навчена та може бути рекомендована для практичного розпізнавання образів.

Принципово відмінним від описаного вище є процес навчання нейронної мережі без зовнішнього втручання вчителя. Такі штучні мережі характеризуються високим ступенем самонавчання, за рахунок самостійного усунення помилки та найвищої оптимізації вхідних параметрів. Це свого роду мережева структура з характеристиками самоконтрольованого навчання. Самонавчання оптимізує мережеву структуру за допомогою зворотної відповідності, а потім оновлює оптимальні параметри кожного рівня штучної мережі. Кожен нейрон мережі пов'язаний з верхнім і нижнім шарами. У процесі обчислення згортки нейрон спільно з іншими використовує набір вагових коефіцієнтів для завершення виділення ознак та усунення похибки. Ваги наявних графів ознак різні, і кожна має власні ваги. На етапі навчання, метод оновлення ваг шляхом повторного проведення робить результати розпізнавання об'єкту більш точними.

Використання нейронних мереж для розпізнавання об'єктів має значні переваги відносно інших методів. Залучені нейронні мережі являють собою систему технологічного зору спостереження за відеоінформацією, зображенням, картою, образом та є найбільш інноваційним напрямом сучасної електроніки. До явних переваг нейронних мереж під час розпізнавання образів слід віднести:

- можливість використання різноманітних за видом та класифікацією даних (числових – абсолютних або відносних; логічних; символічних;

складених; перелічувальних; векторних; абстрактних тощо);

- надійність технічної реалізації поставленої задачі нейронній мережі, що досягається за рахунок можливості обчислення помилок, самокорегування зв'язків між елементами тощо);

- здатність збереження властивостей навченої штучної мережі навіть у разі інформаційної або технічної втрати окремого масиву вхідних даних;

- легкість узагальнення великого масиву вхідних даних, які підлягають розпізнаванню штучною мережею;

- економність людських ресурсів, що проявляється у можливості нейронної мережі самостійно навчатися використовуючи при цьому мінімум експертів або фахівців.

На рисунку 2 зображено типові моделі нейронних мереж, які доцільно використовувати для розпізнавання образів.

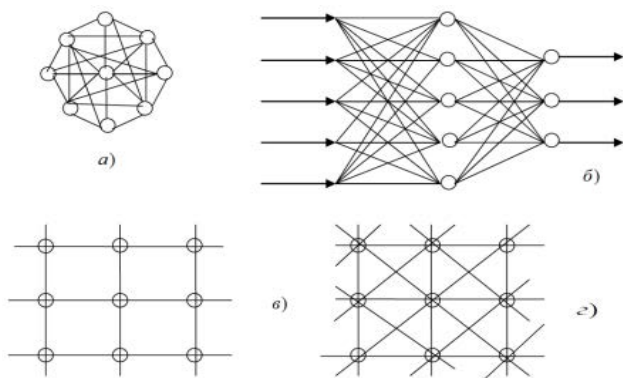


Рис. 2. Моделі нейронних мереж
 (а – повнозв'язна мережа;
 б – багатошарова мережа з послідовними зв'язками; в, г – слабкозв'язні мережі) [11, с. 30]

Використання нейронних мереж для розпізнавання образів особливо підходить у тому випадку, коли застосування точних математичних моделей є занадто складним або ресурсовитратним. Нейронні мережі намагаються імітувати структури образів за допомогою нелінійного відображення між входом і виходом, яке складається з системних синапсів, розташованих різноманітними шарами. В нейронній мережі шари з'єднані таким чином, що сигнал «входу» міг поширюватися через мережу та з мінімальною похибкою досягав вихідної сторони. Поведінка нейронної мережі описується вхідними функціями одиниць, обумовлюється топологією мережі та з'єднується візерунками шарів, об'єктів або карт.

Для розпізнавання образів двошаровий перцептрон є найбільш популярним. Цей вид нейромереж складається з двох рівнів вузлів, прихованого

і вихідного шарів та має односпрямований інформаційний потік. Монотонна нелінійна S -подібна функція зазвичай обирається як функція передачі для вузлів прихованого шару, а лінійна для вузлів вихідного шару. Зазначений вид нейронної мережі можна апроксимувати до будь-якого неперервного відображення, якщо кількість прихованих вузлів достатньо велика. В умовах розпізнавання образів цей вид нейромереж з нелінійною S -подібною функцією та двома шарами ваг може впізнавати об'єкти з високою точністю. Ці характеристики двошарової нейронної мережі прямого зв'язку закладають теоретичну основу для застосування двошарових перцептронів для процесу моделювання та діагностики похибок з розпізнавання образів. Похибки визначаються двома способами – нейромережі програмують модель процесу виправлення розпізнавання образів або обирають класифікатор шаблонів.

Існує значна кількість програмних продуктів для розробки нейронних мереж, які спроможні розпізнавати образи: DALL-E, Matrix Laboratory, Deep Dream Generator, NightCafe, Midjourney, WOMBO Dream, DeepAI, Pixray тощо. Як приклад, програмний ресурс «Matrix Laboratory» пропонує сукупність інструментів для глибокого машинного навчання нейронних мереж. Використовуючи лише кілька рядків коду програмного ресурсу «Matrix Laboratory» можливо розробляти нейронні мережі, не будучи фахівцем з програмування. Розробка програмних додатків штучного інтелекту, зокрема нейронних мереж, зазвичай передбачає такі кроки:

- формування незначної кількості валідних навчальних даних (у разі навчання глибоких нейронних мереж вхідних даних необхідно більше);

- навчання неглибоких нейронних мереж в інтерактивному режимі або з використанням функції командного рядка (якщо існує потреба порівняння продуктивності неглибоких нейронних мереж з іншими звичайними алгоритмами машинного навчання);

- тестування отриманої нейронної мережі та аналіз її результатів.

Розпізнавання образів на основі нейронних мереж можливе у таких різноманітних секторах, як: економіка, фінанси, охорона здоров'я, фармацевтика, правоохоронна діяльність, автомобільна, аерокосмічна промисловість або виробництво інноваційних продуктів. Компанії, що розробляють технології допомоги водієві та новітні автономні транспортні засоби, використовують нейронні мережі для аналізу даних світлофорів, дорожніх знаків, датчиків підключених до транспортних засобів та

інших засобів направлених зручні умови водіння. З метою покращення роботи літака та зменшення витрат на його технічне обслуговування, виробники двигунів створюють штучні мережі в режимі реального часу для прогнозування продуктивності тієї або іншої деталі, її впливу на: витрати палива, вчасність старту, механічний стану судна та елементи керування. Складні програми прогнозування використовують штучні мережі, які відстежують забруднення повітря та його причини, майбутню погоду або розраховують момент настання катаклізму. Фінансові установи використовують штучні мережі для прогнозування кредитного ризику, розпізнання за фотографіями користувачів банківських послуг при наданні банківського продукту тощо. Активно використовується штучний інтелект для опису отриманих результатів пацієнтів, що пройшли діагностику на медичних пристроях тощо.

Висновки. Отже, розпізнавання образів на основі нейронних мереж досліджена у наукових працях багатьох вітчизняних та закордонних вче-

них. Однак швидкі темпи інформатизації економіки України вимагають постійного перегляду методів розпізнання образів в використанні штучного інтелекту. Ми визначили, що еволюція розвитку нейронних мереж є нетривалою. Зокрема перший перспетрон був розроблений у кінці 50-х років 20 ст. Нейронні мережі – один з інструментів реалізації штучного інтелекту, які мають складну багаторівневу архітектоніку. Першоджерелом походження штучного інтелекту є біологічний інтелект. Для розпізнавання образів використовують чисельні види нейронних мереж: багатошарові нейронні мережі, які відрізняються від інших наявністю більше одного шару штучних вузлів; нейронна мережа вищого порядку, що містить лише один шар; мережа Гопфільда та самоорганізуючі нейронні карти Кохонена, які допомагають аналізувати економічні, демографічні, фінансові процеси. Метою наших подальших досліджень буде практичне використання інструментарію нейромодельовання для діагностики образів.

Список літератури:

1. Лебідь О., Кіпоренко С., Вовк В. Виявлення кібератак та підвищення інформаційної безпеки на основі технології нейронних мереж в умовах кібервійни. *Наука і техніка сьогодні*, 2023. № 1 (15). С. 238–256. DOI: [https://doi.org/10.52058/2786-6025-2023-1\(15\)-238-256](https://doi.org/10.52058/2786-6025-2023-1(15)-238-256).
2. Мясіщев О.А., Ленков Є.С., Білик О.М. Розпізнавання графічних образів з використанням нейронних мереж. *Збірник наукових праць Військового інституту Київського національного університету імені Тараса Шевченка*, 2016. № 54, С. 1438–149. URI: chrome-extension://efaidnbmninnibpcapjpcgclefindmkaj/http://www.library.univ.kiev.ua/ukr/host/viking/db/ftp/univ/znp_vi_knu/znp_vi_knu_2016_54.pdf.
3. Мірошник О.О. Комп'ютерне моделювання нейронної мережі для розпізнавання вейвлет-образів. *Вісник Харківського національного технічного університету сільського господарства імені Петра Василенка*, 2014. № 154, С. 57–58. URI: http://nbuv.gov.ua/UJRN/Vkhdtusg_2014_154_22.
4. Мозговенко А.А., Зінов'єва О.Г. (). Аналіз методів комп'ютерного зору в задачах ідентифікації осіб у відеопотоці. *Таврійський науковий вісник. Серія: Технічні науки*, 2022. № 3, С. 56–62. DOI: <https://doi.org/10.32851/tnv-tech.2022.3.6>.
5. Димо О.Б., Морозова Г.С. Використання нейронної мережі Кохонена у проектах розпізнавання рекламних текстів. *Управління проектами та розвиток виробництва*, 2010. № 4 (36). С. 44–50. URI: <file:///C:/Users/Asus/Downloads/ispolzovanie-neyronnoy-seti-kohonena-v-proektah-raspoznavaniya-reklamnyh-tekstov.pdf>.
6. Мірошник О.О., Святобатько А. В. Моделювання нейронної мережі для задач прогнозування фізичних параметрів. *Праці Таврійського державного агротехнологічного університету*, 2013. № 13(5). С. 34–40. URI: chrome-extension://efaidnbmninnibpcapjpcgclefindmkaj/https://nauka.tsatu.edu.ua/print-journals-tdata/13-5/13_5/zmist.pdf.
7. Peleshchak R. M., Lytvyn, V. V. Cherniak O. I., Peleshchak I. R., & Doroshenko M. V. Stochastic pseudospin neural network with tridiagonal synaptic connections. *Radio Electronics, Computer Science, Control*, 2021. № 2. С. 114–122. <https://doi.org/10.15588/1607-3274-2021-2-12>.
8. Дзензура О.А., Лунова М. Нейронна мережа Гопфільда та сучасні програмні засоби їх проектування. *Наукові записки молодих учених*, 2021. № 8. URI: <https://phm.cuspu.edu.ua/ojs/index.php/SNYS/article/view/1862/pdf>.
9. Дашкевич А.О. Дослідження багатошарових нейронних мереж для автоматичного виділення ознак при вирішенні задачі розпізнавання образів. *Науковий вісник ТДАТУ*, 2016. № 6 (2), С. 134–139.
10. Клещ Д.С., Федорченко В.М. Аналіз підходів до розв'язання задач розпізнавання образів з використанням штучного інтелекту. *Системи управління, навігації та зв'язку*, 2023. № 71, С.96–100. DOI: <https://doi.org/10.26906/SUNZ.2023.1.096>.

11. Шемет С.В. Застосування згорткової нейронної мережі для обробки та аналізу МРТ-зображень: кваліфікаційна робота / Шемет С.В. Харків, 2022. С. 62. URI: <https://openarchive.nure.ua/handle/document/22453>.

12. Gencoglu O., Virtanen T., Huttunen H. Recognition of acoustic events using deep neural networks. *EUSIPCO 2014, 22th European Signal Processing Conference, 1-5 September 2014, Lisbon, Portugal. Tampere, Finland. Institute of Electrical and Electronics Engineers*, 2014. С. 506–510. URI: <https://researchportal.tuni.fi/en/publications/recognition-of-acoustic-events-using-deep-neural-networks>.

Mogyevych D.I., Khmil R.V. ANALYSIS OF PATTERN RECOGNITION METHODS BASED ON NEURAL NETWORKS

Modern society is in constant information movement, which accelerates its digitization and actualizes the issue of using artificial intelligence in all sectors of the economy. Increased competition at all levels requires the introduction of innovations, assimilation of the results of scientific progress and its active use in everyday life. Methods of pattern recognition based on neural networks, as well as tools for implementing neuromodeling, require more and more attention. In the process of writing the article, we used the methods of analysis, synthesis, induction, deduction, and logical generalization. The study determined the evolution of the formation and development of neural networks and outlined its close connection with biological intelligence. It was found that artificial neural networks based on biological analogues. With the use of mathematical models, similar to nerve cells, numerical or qualitative indicators form input and output arrays of data, which are characterized by emergent and synergistic functions. The types of neural networks that differ from each other by the presence of a certain number of layers of artificial nodes are distinguished. It is substantiated that neural networks differ in their ability to learn independently or learn with a teacher. It is noted that the use of neural networks for object recognition has significant advantages over other methods. Involved neural networks represent a system of technological vision for monitoring video information, images, maps, images and are the most innovative direction of modern electronics. It has been found that pattern recognition based on neural networks is possible in such sectors as: economy, finance, health care, pharmaceuticals, law enforcement activities, automotive and aerospace industries, production of innovative products. Prospects for further research are identified, in particular, the practical use of neuromodeling tools for diagnosing images.

Key words: artificial intelligence, neural networks, perceptron, biological intelligence, neuromodeling.

УДК 621.38

DOI <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2023.5/10>**Осадчук О.В.**

Вінницький національний технічний університет

Ліхашорський С.В.

Вінницький національний технічний університет

ДОСЛІДЖЕННЯ ДИНАМІЧНОЇ НЕСТАБІЛЬНОСТІ В АКТИВНИХ НВЧ ФІЛЬТРІВ І МЕТОДИ ЇЇ ЗМЕНШЕННЯ

Активні мікрохвильові фільтри відіграють вирішальну роль у сучасних системах зв'язку, але забезпечення їх динамічної стабільності за змінних рівнів потужності сигналу залишається проблемою. У статті досліджено динамічні характеристики активних мікрохвильових фільтрів і запропоновано методи їх стабілізації. Визначено ключові вимоги до цих фільтрів, включаючи динамічний діапазон рівнів потужності вхідного сигналу 20 дБ, рівномірність смуги пропускання та мінімальний коефіцієнт передачі за межами смуги пропускання. Обговорюються різні методології тестування, підкреслюючи необхідність точності та чутливості через малу смугу пропускання фільтра та широкий діапазон рівнів вхідної потужності.

У статті представлено три схеми вимірювання з акцентом на усуненні їх обмежень. Щоб подолати ці проблеми, представлено новий підхід, що використовує перехідні явища в транзисторах. Цей підхід включає пасивні схеми, які забезпечують негативний зворотний зв'язок по струму, ефективно стабілізуючи параметри фільтра у відповідь на зміни вхідної потужності.

Експериментальні результати демонструють ефективність ланцюгів динамічної стабілізації для підтримки продуктивності фільтра в межах заданих допусків. Стаття завершується обговоренням конструкції багатоканального селективного блоку на основі принципу динамічної стабілізації, підкреслюючи його потенціал для високоселективних конструкцій фільтрів із низькими втратами.

Це дослідження пропонує цінну інформацію про динамічну поведінку активних мікрохвильових фільтрів і пропонує практичні рішення для підвищення їх стабільності, що робить їх більш надійними компонентами в сучасних системах зв'язку. Звертаючись до складнощів динамічної нестабільності, ця робота сприяє вдосконаленню технології мікрохвильових фільтрів, уможливаючи продовження еволюції бездротового зв'язку та радіолокаційних систем із покращеною продуктивністю та надійністю.

Ключові слова: мікрохвильові фільтри, НВЧ фільтри, динамічна стабільність, рівні потужності сигналу, транзисторна стабілізація, системи зв'язку.

Постановка проблеми. Активні мікрохвильові фільтри є основним компонентом різноманітних систем зв'язку та радіолокації, забезпечуючи необхідну частотну вибірковість для забезпечення цілісності сигналу та оптимальної продуктивності. Ці системи мають важливе значення для різноманітних застосувань: від бездротового зв'язку до дистанційного зондування тощо. Ефективність і надійність цих систем значною мірою залежать від динамічної стабільності активних мікрохвильових фільтрів, які в них використовуються.

Основна проблема, розглянута в цій статті, стосується динамічної нестабільності, яку демонструють активні мікрохвильові фільтри під впливом змінних рівнів потужності сигналу. Це питання створює серйозну проблему при проектуванні та впровадженні сучасних систем зв'язку.

Гарантія того, що ці фільтри можуть підтримувати свої задані характеристики продуктивності в широкому діапазоні рівнів потужності вхідного сигналу, має вирішальне значення для задоволення вимог сучасних комунікаційних і радіолокаційних технологій.

У своїй основі ця проблема переплітається з такими науково-практичними завданнями:

Підвищення стійкості системи: динамічна нестабільність активних мікрохвильових фільтрів може призвести до погіршення продуктивності та спотворення сигналу в системах зв'язку та радарів. Вирішуючи цю проблему, ми прагнемо підвищити стійкість цих систем, забезпечуючи послідовну та надійну роботу навіть за різних умов сигналу.

Оптимізація конструкції фільтра: розробка методів динамічної стабілізації не тільки вирішує миттєві проблеми, але й дозволяє розробляти

більш ефективні та компактні активні мікрохвильові фільтри. Ця оптимізація має вирішальне значення для зниження системних витрат і споживання енергії.

Розвиток комунікаційних технологій: у сучасному світі надійний і високошвидкісний зв'язок має першочергове значення. Вирішення проблеми динамічної нестабільності активних мікрохвильових фільтрів сприяє розвитку комунікаційних технологій, підтримці розвитку бездротових мереж, передачі даних та інших критичних програм.

Можливість точного зондування: Радар і системи дистанційного зондування покладаються на точну обробку сигналу. Динамічна нестабільність у фільтрах може поставити під загрозу точність цих систем. Вирішення цієї проблеми забезпечує точність і надійність датчиків у таких сферах, як метеорологія, моніторинг навколишнього середовища та оборона.

Відповідність галузевим стандартам: багато галузей мають суворі стандарти для систем зв'язку та радіолокаційних систем, зокрема щодо якості та стабільності сигналу. Вирішення проблеми динамічної нестабільності узгоджується з метою відповідності галузевим стандартам і правилам.

Підводячи підсумок, можна сказати, що динамічна стабільність активних мікрохвильових фільтрів є ключовою проблемою, що має далекосяжні наслідки як для наукових досліджень, так і для практичних застосувань. Вивчаючи це питання та пропонуючи інноваційні методи стабілізації, ми сприяємо розвитку технологій, які лежать в основі сучасних комунікаційних, зондових і радіолокаційних систем, зрештою формуючи спосіб підключення та взаємодії в нашому все більш взаємопов'язаному світі.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. У сфері активних мікрохвильових фільтрів та їх динамічної стабільності останні дослідження та публікації пролили світло на виклики та інновації в цій важливій галузі. Цей аналіз дає уявлення про поточний стан наукової думки, висвітлюючи ключові висновки та нові тенденції, на яких базується наш підхід у цій статті.

Динамічна стабільність і обробка сигналів:

Останні дослідження [1–4] підкреслили ключову роль динамічної стабільності в обробці сигналів, особливо в контексті систем зв'язку та радіолокації. Досліди виявили вплив динамічної нестабільності на якість сигналу, частоту помилок і загальну продуктивність системи. Отримані дані свідчать про сильну кореляцію між стабільністю фільтра та ефективністю обробки сигналу.

У монографії [3] підкреслюється критична роль функціональних вузлів у радіовимірювальних пристроях та їх потенціал для покращення продуктивності. Незважаючи на те, що стаття в основному стосується функціональних вузлів у радіовимірювальних пристроях, її принципи, методології та підходи відіграють значущу роль у розвитку активних мікрохвильових фільтрів. Впроваджуючи економічно ефективні інновації, аналізуючи вимоги та узгоджуючи характеристики з потребами застосування, розробники активних мікрохвильових фільтрів можуть підвищити продуктивність і економічну ефективність цих критичних компонентів у сучасних системах зв'язку та радіолокації.

Помітною тенденцією в останніх дослідженнях [2, 4] є використання перехідних процесів у транзисторах для динамічної стабілізації. Цей підхід, представлений у нашій статті, привернув увагу завдяки своїй здатності ефективно протидіяти нестабільності, викликаній різними рівнями потужності вхідного сигналу. Досліди показали нюанси реалізації пасивних схем для забезпечення негативного зворотного зв'язку по струму та стабілізації параметрів фільтра.

У монографії [5] ширша увага приділяється до технологічному прогресу, економічно ефективним рішенням, покращених технічних характеристик, а також включає рішення для покращення стабілізації частоти та амплітуди що безпосередньо сприяє розвитку активних мікрохвильових фільтрів. Надихаючись принципами та методологіями монографії, дослідники можуть працювати над розробкою високопродуктивних, економічно ефективних і стабільних активних мікрохвильових фільтрів, які відповідають вимогам сучасних систем зв'язку та радіолокації.

Підсумовуючи, у роботі [6–9] акцент зроблений на UVЧ-кварцових MEMS-генераторах та їх новітніх застосуваннях, що мають прикладне застосування для активних мікрохвильових фільтрів. Ці осцилятори можуть сприяти підвищенню стабільності, зменшенню фазового шуму та розширеним можливостям інтеграції, що робить їх цінними компонентами при проектуванні та розробці вдосконалених активних мікрохвильових фільтрів для різноманітних радіочастотних та мікрохвильових застосувань.

На завершення, нещодавні дослідження та публікації підкреслюють критичну роль динамічної стабільності в активних мікрохвильових фільтрах у ширшому контексті систем зв'язку, радіолокації та зондування. Ці дослідження поглибили

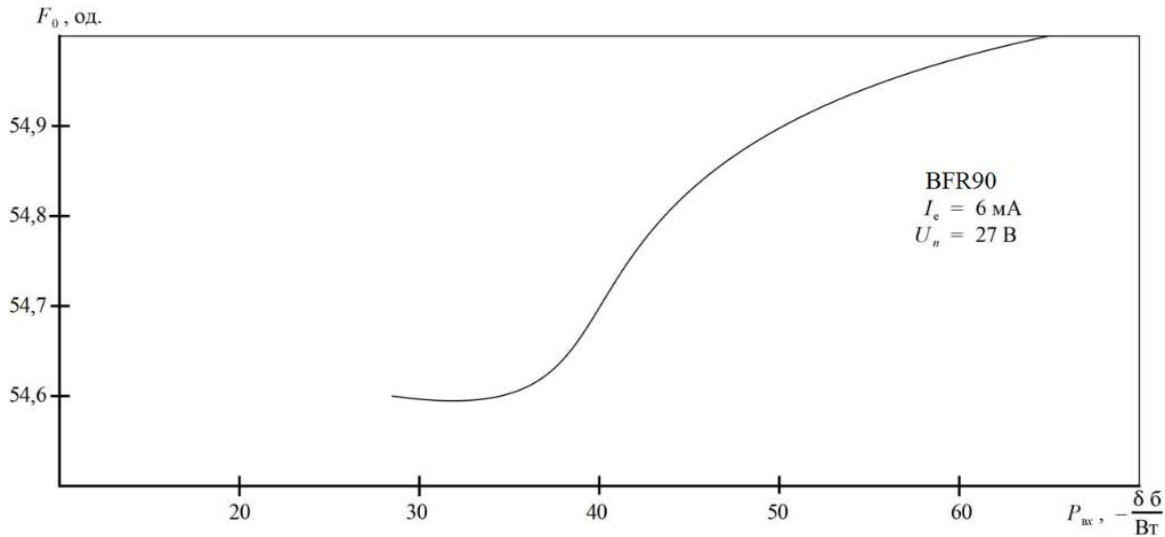


Рис. 1. Експериментальна залежність квазірезонансної частоти F_0 від рівня вхідної потужності без динамічної стабілізації

наше розуміння проблем, пов'язаних із динамічною нестабільністю, і запропонували інноваційні рішення для вирішення цих задач.

Метою роботи є розробка та дослідження активного НВЧ фільтра з такими характеристиками:

1. Динамічний діапазон рівнів потужності вхідного сигналу 20дБ при $P_{вх} = -48\text{дБ} / \text{вт}$ (або при $P_{вх} = -58\text{дБ} / \text{вт}$) у залежності від коефіцієнта передачі активного фільтра.

2. Нерівномірність у смузі пропуску кожного каналу між рівнями потужності на граничних частотах $F_{з.р.н}$ і $F_{з.р.в}$ і на середній F_0 повинна бути не менше 2 дБ.

3. Коефіцієнт передачі поза смуги пропускання повинен бути менше коефіцієнта передачі на середній частоті не менше чим на:

- а) 15 дБ на $(F_{зрн} - 4,5)$ і на $(F_{зрв} + 4,5)$;
- б) 30 дБ на $(F_{зрн} - 9)$ і на $(F_{зрв} + 9)$;
- в) 40 $(F_{зрн} - 20)$ і на $(F_{зрв} + 20)$;

4. При всіх видах випробувань допускається:

а) зміщення частотних характеристик всіх фільтрів вправо чи (вліво) по частоті, но не більше чим на 2 мГц при відносній розбіжності ЧХ сусідніх фільтрів не більше чим 0,2 мГц;

б) зменшення (чи збільшення) коефіцієнта передачі на частотах в смузі пропускання кожного каналу не більше, чим на 1дб;

в) зменшення в коефіцієнті передачі поза смуги пропускання по відношенню до коефіцієнта пере-

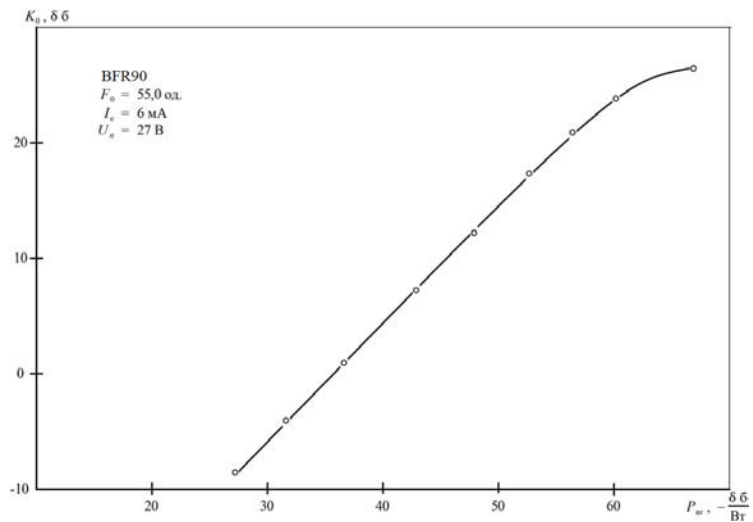


Рис. 2. Експериментальна залежність коефіцієнта передачі K_0 від рівня вхідної потужності $P_{вх}$ без кола динамічної стабілізації

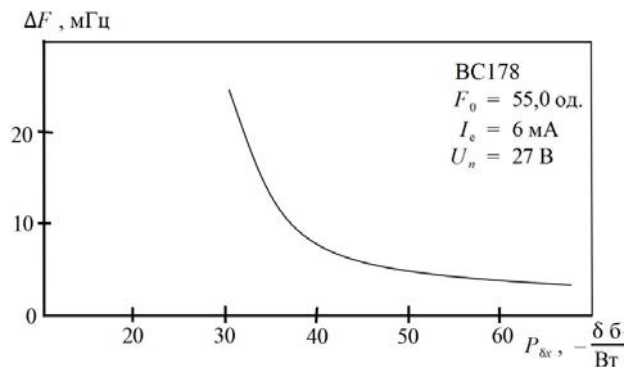


Рис. 3. Експериментальна залежність смуги пропускання ΔF від рівня вхідної потужності без динамічної стабілізації

дачі на середній(чи на будь-якій іншій другій частоті смуги пропускання фільтра з максимальним рівнем вхідної потужності) не менше, ніж на:

- 14 дБ на ($F_{зрн} - 4,5$) і на ($F_{зрн} + 4,5$);
- 27 дБ на ($F_{зрн} - 9$) і на ($F_{зрн} + 9$);
- 37 дБ на ($F_{зрн} - 20$) і на ($f_{зрв} \cong (F_{зрв} \pm 120)$), тобто, у всіх.

Ціллю динамічних випробувань активних НВЧ фільтрів є визначення змін параметрів АЧХ фільтрів в залежності від потужності вхідного сигналу.

Виклад основного матеріалу. Дослідження показали, що застосування невзаємної схеми активного НВЧ фільтра дозволяє підвищити динамічну стабільність фільтра. На рис 1-4; представлені залежності квазірезонансної частоти F_0 , модуля коефіцієнта передачі на цій частоті K_0 , умовної смуги пропускання ΔF і коефіцієнта передачі F_{25} при побудові графіка 25 МГц відносно квазірезонансної частоти від потужності вхідного сигналу.

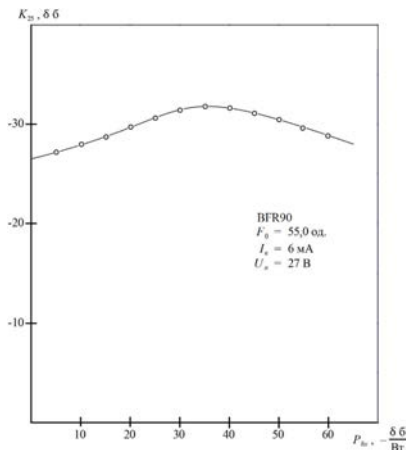


Рис. 4. Експериментальна залежність модуля коефіцієнта передачі K25 при відбудові на 25 МГц відносно квазірезонансної частоти

Як видно із графіків в динамічному діапазоні 20 дБ, при мінімальній потужності на виході $-48\text{дБ} / \text{Вт}$, нестабільність вищевказаних параметрів має наступні значення (табл. 1):

Таблиця № 1

№	Назва параметра	Експериментальні дані	Вимоги ТЗ
1.	Квазірезонансна частота	4 МГц	2 МГц
2.	Умозна смуга пропуску	2 МГц	1 МГц
3.	Коефіцієнт передачі на квазірезонансній частоті	10 МГц	1 дБ
4.	Коефіцієнт передачі поза смуги пропуску	5 дБ	3 дБ

Із таблиці 1 слідує, що для забезпечення вимог ТЗ необхідно застосувати коло, що підвищує динамічну стабільність ФАПЧ.

Вимоги до кола динамічної стабілізації і вибір метода

Із результатів експериментальних досліджень, проведених в попередньому параграфі вказує, що зі збільшенням потужності сигналу на вході активного НВЧ фільтра, відбувається зменшення модуля коефіцієнта передачі $|K|$ на квазірезонансній частоті, зменшення квазірезонансної частоти F_0 і розширення смуги пропуску ΔF .

У радіотехніці відомі схеми призначені для автоматичного впливу на динамічні параметри транзисторних пристроїв. Наприклад, схеми автоматичного регулювання підсилення (АРП). АРП використовується в підсилювачів для запобігання перевантаження їх великим вхідним сигналом. У транзисторних підсилювачів підстелення регулюють зміною режиму роботи транзистора або опором навантаження каскаду і кола зворотного зв'язку по змінному струму.

При режимному регулюванні використовується залежність параметрів транзистора і коефіцієнта підсилення каскаду від струму колектора. Зміна колекторного струму відбувається під дією напруги регулювання, залежного від напруги на виході. Напруга регулювання подається на електроди регульованого транзистора безпосередньо або через допоміжний параметричний елемент, в якості якого зазвичай використовують регульований транзистор.

При регулюванні по змінному струму режим роботи каскаду залишається незмінним, а регульований вплив подається на елемент, що утворює коло навантаження каскаду або коло його негативного зворотного зв'язку по змінному струмі. Те, що відбувається під дією вхідної напруги зміни опору цього елементу призводить до відповідної зміни коефіцієнту підсилення каскаду.

Таким чином коефіцієнт підсилення підсилювача з ціллю АРП змінюється в залежності від вихідного сигналу. При побудові активних НВЧ фільтрів необхідно підтримувати постійний коефіцієнт передачі фільтра при зміні потужності вхідного сигналу. Через це, застосовані в справжній час в радіоприймальній апаратурі кола АРП не можуть бути застосовані для підвищення динамічної стабільності активних НВЧ фільтрів загального застосування. Проте, метод АРП може бути використаний для підвищення динамічної стабільності активних НВЧ фільтрів.

Принцип стабілізації динамічних параметрів активних НВЧ фільтрів

Дослідження залежності параметрів активних НВЧ фільтрів від режиму живлення по постійному струму показали, що їх коефіцієнт передачі K_0 , квазірезонансна частота F_0 і смуга пропуску ΔF залежать від режиму живлення по постійному струму.

Ця залежність використана при побудові кола динамічної стабілізації в активних НВЧ фільтрах, що використовують прогонові явища в транзисторах.

При побудові цих кіл виходили з вимог створення активних НВЧ фільтрів з мінімальною кількістю елементів, особливо активних, що дозволяє підвищити температурну стабільність і надійність, зменшити розміри, масу та вартість.

В зв'язку з цим для динамічної стабілізації активних НВЧ фільтрів використовувалися пасивні кола, що забезпечували послідовний негативний зворотній зв'язок по струму. Потрібна глибина зворотного зв'язку забезпечувалась за допомогою вибору величини резистора зв'язку. Принципіальна схема активного НВЧ фільтра з колом динамічної стабілізації представлена на рис. 5.

Керуючий вплив (напруга) знімається з резистора, включеного в НВЧ тракт з активним НВЧ фільтром. Величина керуючої напруги $U_{кер}$ пропорційна потужності НВЧ сигналу (рис. 6). Керуюча напруга подається на перехід «колектор – база» транзистора V_1 і керує напрямом. Ємність C_1 є роздільною. Індуктивності L_1 і L_2 можуть бути виконані або у вигляді високоомних відрізків НВЧ тракту довжиною $\frac{\lambda_g}{4}$ або у вигляді мікрокотушок індуктивності. Застосування останніх дозволяє зменшити розміри активного НВЧ фільтра, но знижує його надійність і технологічність.

У схемі робоча точка забезпечується вибором резистора. В залежності від положення робочої точки на ділянці змінюється діапазон стабілізації рис. 7 – 9.

Принцип роботи кола стабілізації

При збільшенні потужності сигналу $P_{вх}$ збільшується керуюча напруга на резисторі U_p , а коефіцієнт передачі фільтра зменшується. З допомогою індуктивностей L_1 і L_2 воно подається на перехід «колектор – база» транзистора V_1 таким чином, щоб збільшити результативну напругу $U_{кб}$, що призводить до збільшення коефіцієнта передачі фільтра, визвано збільшенням потужності вхідного сигналу.

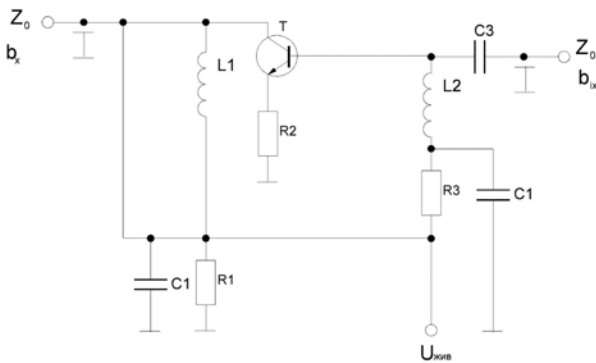


Рис. 5. Принципіальна схема активного НВЧ фільтра з динамічною стабілізацією

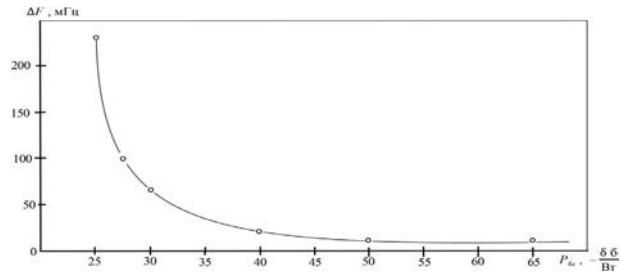


Рис. 6. Експериментальна залежність падіння напруги від зміни вхідної потужності P

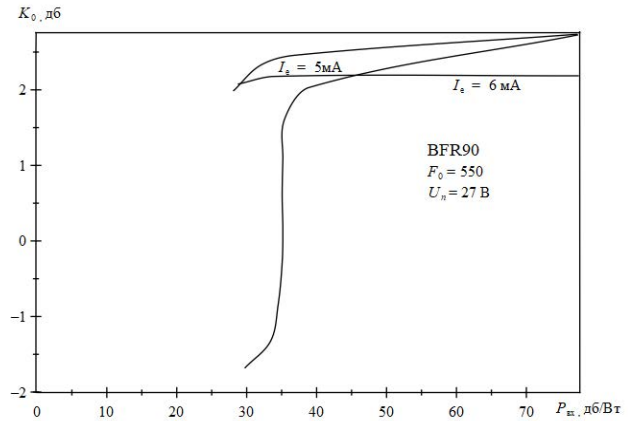


Рис. 7. Експериментальна залежність коефіцієнта K_0 рівня вхідної потужності $P_{вх}$ з цілю стабілізації

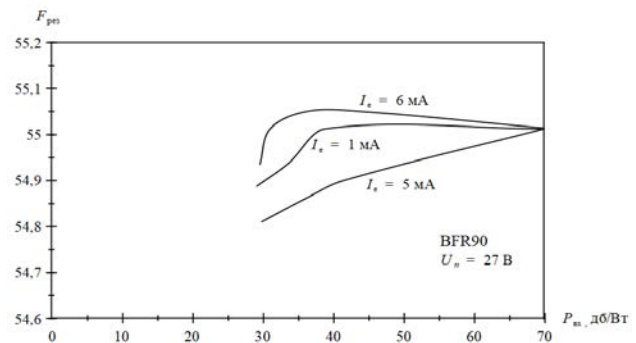


Рис. 8. Експериментальна залежність квазірезонансної частоти $F_{рез}$ від рівня вхідної потужності $P_{вх}$ з цілю стабілізації

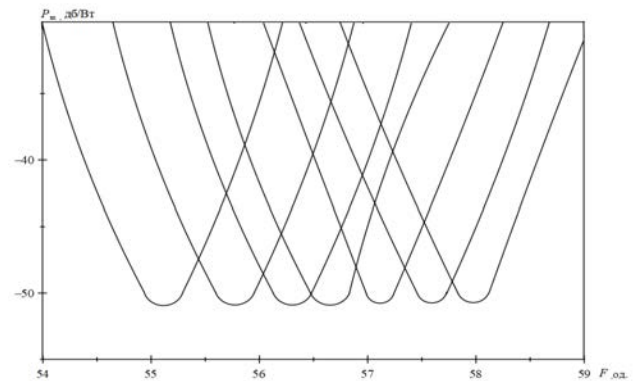


Рис. 9. Експериментальна залежність рівня вхідної потужності від частоти вхідного сигналу F

В таблиці 2 вказані максимальні значення абсолютної динамічної нестабільності параметрів активних НВЧ фільтрів з колом в порівнянні з вимогами ТЗ.

Таблиця 2

№	Назва параметра	Експериментальні дані	Вимоги ТЗ
1.	Максимальний коефіцієнт передачі фільтра	0.5 дБ	1 дБ/вт
2.	Квазірезонансна частота	1 МГц	2 МГц
3.	Умовна смуга пропуску	1 МГц	1 МГц
4.	Коефіцієнт передачі за межею смуги пропуску	2 дБ	3 дБ

Висновки. Аналіз результатів приведених в таблиці 2 показує, що динамічна стабільність

розробленого активного НВЧ фільтру з КДС відповідає вимогам ТЗ. Завдяки ряду експериментів і аналізів ми досягли значних успіхів у характеристиці динамічної поведінки активних мікрохвильових фільтрів. Ці характеристики включили оцінку таких параметрів, як квазірезонансна частота, коефіцієнт передачі та пропускна здатність, усі з яких життєво важливі для їх належного функціонування. Наші результати показали, що за допомогою даної схем динамічної стабілізації ми можемо відповідати або навіть перевищувати вказані технічні вимоги.

По мірі просування вперед постійні дослідження та інновації в цій галузі будуть необхідними для подальшого вдосконалення та впровадження цих динамічних рішень, гарантуючи, що активні мікрохвильові фільтри продовжуватимуть відповідати змінним вимогам сучасних систем зв'язку та навігації.

Список літератури:

1. Suarez A. Check the Stability: Stability Analysis Methods for Microwave Circuits. *IEEE Microwave Magazine*, 2015. Pp. 69–90. doi:10.1109/MMM.2015.2410951
2. Осадчук В. С., Осадчук О. В. Реактивні властивості транзисторів і транзисторних схем. *Універсум-Вінниця*. 1999. С.275.
3. Осадчук В. С., Осадчук О. В., Семенов А. О., Коваль К. О. Функціональні вузли радіовимірювальних приладів на основі реактивних властивостей транзисторних структур з від'ємним опором. *ВНТУ*. 2011. С.336. ISBN 978-966-641-405-5.
4. Філінюк М. А., Ліщинська Л. Б. Активні УВЧ і НВЧ фільтри. *ВНТУ*, 2010. С.396.
5. Осадчук В. С., Осадчук О. В., Семенов А. О. Генератори електричних коливань на основі транзисторних структур з від'ємним опором. *УНІВЕРСУМ-Вінниця*. 2009. С.182.
6. Kubena R. L. Next Generation Quartz Oscillators and Filters for VHF-UHF Systems. *IEEE MTT-S International Microwave Symposium Digest*. 2006. Pp. 668-671. <https://doi.org/10.1109/MWSYM.2006.249703>
7. Chang D., Stratton F., Kubena R., Joyc R. Optimized DRIE Etching of Ultra-Small Quartz Resonators. *Proceedings of the 2003 IEEE International Frequency Control Symposium*. 2003. Pp. 829-832. doi:10.1109/FREQ.2003.1275198
8. Stratton F. P. A MEMS-based Quartz Resonator Technology for GHz Applications. *Proceedings of the 2004 IEEE International Frequency Control Symposium and Exposition*. 2004. Pp. 27-34.
9. Osadchuk V.S., Osadchuk O.V., Osadchuk I.O. Modern world tendencies in the development of science. Gas concentration transducers with frequency output signal based on reactive properties of semiconductor structures with negative differential resistance. *Science Publishing*. 2019. Pp. 271–285. ISBN 978-1-9993071-4-1

Osadchuk A.V., Likhoshorskyi S.V. DYNAMIC STABILITY ANALYSIS AND STABILIZATION METHODS FOR ACTIVE MICROWAVE FILTERS

Active microwave filters play a crucial role in modern communication systems, but ensuring their dynamic stability under varying signal power levels remains challenging. This article explores the dynamic characteristics of active microwave filters and proposes methods for their stabilization. Key requirements for these filters include a 20 dB dynamic range of input signal power levels, bandwidth uniformity, and minimal transmission coefficient outside the bandwidth. Various testing methodologies are discussed, highlighting the need for precision and sensitivity due to the small filter bandwidth and wide range of input power levels.

The article presents three measurement schemes with a focus on addressing their limitations. A novel approach utilizing transient phenomena in transistors is introduced to overcome these challenges. This approach involves passive circuits that provide negative current feedback, effectively stabilizing filter parameters in response to changes in input power.

Experimental results demonstrate the effectiveness of dynamic stabilization circuits in maintaining filter performance within specified tolerances. The article concludes by discussing the construction of a multi-channel selection unit based on this dynamic stabilization principle, highlighting its potential for highly selective and low-loss filter designs.

This research offers valuable insights into the dynamic behavior of active microwave filters and provides practical solutions to enhance their stability, making them more reliable components in modern communication systems. By addressing the complexities of dynamic instability, this work contributes to advancing microwave filter technology, enabling the continued evolution of wireless communication and radar systems with improved performance and reliability.

Key words: microwave filters, dynamic stability, signal power levels, transistor-based stabilization, communication systems.

УДК 621.39

DOI <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2023.5/11>**Романов О.І.**Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»**Бурлака Г.Ю.**Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

УПРАВЛІННЯ МЕРЕЖЕЮ SDN З ВИКОРИСТАННЯМ КОНТРОЛЕРА RYU

На сьогоднішній день з'ясовано що найбільш складні завдання в мережах SDN стоять перед рівнем управління. Вирішення цих завдань покладається на контролер, основним елементом якого є мережева операційна система. У цій статті розглянуто особливості побудови контролера Ryu, протоколи та інтерфейси, функціональний склад елементів. Наведено порівняльну характеристику даного контролерами з іншими та оцінено за певними критеріями, завдяки яким можна отримати загальну картину позитивних та негативних сторін цього контролера. В цій статті розкрито принципи побудови мережі mininet з використанням даного контролера.

В цій статті описано що являє собою контролер Ryu а саме відкритий контролер мережі (SDN), призначений для підвищення гнучкості мережі за рахунок посилення управління та адаптації способів обробки трафіку. В загальному, контролер SDN – це мозкова середовище SDN, що передає інформацію про комутатори та маршрутизатори за допомогою південних API, а також про програми та бізнес-логіку за допомогою північних API. Структура Ryu відрізняється від інших рішень тим, що вона надає просту допоміжну інфраструктуру, яку користувачі платформи повинні написати для використання на власний розсуд. Хоча для цього потрібний досвід розробки, це також забезпечує повну гнучкість рішення SDN. Існуючі компоненти можна швидко і легко оновлювати і об'єднувати в існуючі мережі, щоб задовольнити потреби різних програм, що змінюються, використовуючи ці компоненти.

У статті розглянуті компонентні складові контролера Ryu його позитивні і негативні сторони в порівнянні з іншими контролерами. Розглянуто особливості побудови контролера Ryu, протоколи та інтерфейси, функціональний склад елементів. Також побудовано мережу SDN з використанням контролера Ryu та емулятора mininet, в цій топології перевірено працездатність контролера та проведено тестування параметрів функціонування мережі, для цього проведено тестування пропускної здатності каналів зв'язку у напрямку від h11 до h9.

Ключові слова: mininet, Ryu Controller, OpenFlow, ONOS, APP Manager, Ryu Libraries, пропускна здатність.

Постановка проблеми. Традиційні мережі обмежені рядом вимог до послуг, а також розміром мережі. Ці вимоги стосуються інженерного трафіку, керування потоком, реалізації політики, надійності, і деякі з них включають віртуалізацію. Мережі стають дедалі складнішими, їх важко проектувати та експлуатувати. Програмно визначена мережа (SDN) – це відносно нова мережева архітектура, яка стала найбільш обговорюваною мережевою технологією за останні роки та останньою розробкою в галузі цифрових мереж. Мета даної розробки – зробити ресурси більш керованими, безпечними та контрольованими.

SDN використовується, щоб зробити мережі більш програмованими та полегшити керування мережею. Це дозволяє традиційним мережам розділяти функції рівня керування та даних,

створюючи більш динамічний, адаптований, автоматизований та керований дизайн. Мережа програмується за допомогою програмних додатків, які взаємодіють із пристроями рівня даних, які стають основними елементами пересилання та не мають прямого фізичного контролю над ними. Він відокремлює функціональність керування від інструменту мережевої площини та централізує його, маючи ефективне перенаправлення трафіку на відміну від традиційних мереж.

Архітектура програмно-конфігурованої мережі складається з трьох рівнів: додатків, управління та інфраструктури, пов'язаних один з одним через відкриті API-інтерфейси (рис. 1).

Рівень додатків складається зі служб і програм, які мережа надає користувачеві, обробляє статистичні дані про стан мережевих елементів, забезпечує

автоматизовану зміну протоколів при налаштуванні мережі, віртуалізує мережеві функції та інше.

Рівень керування містить контролер, який є основою цієї технології, оскільки він відповідає за маршрутизацію, управління та контрольні рішення для всіх функцій мережі.

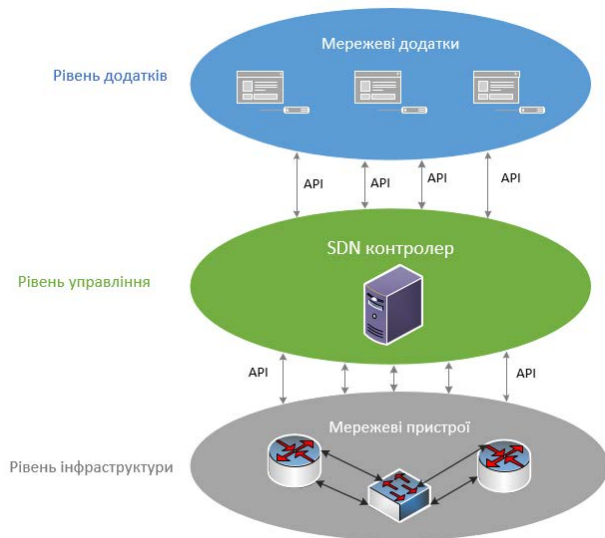


Рис. 1. Загальна архітектура SDN

Рівень керування містить контролер, який є основою цієї технології, оскільки він відповідає за маршрутизацію, управління та контрольні рішення для всіх функцій мережі. Цей рівень взаємодіє з прикладним рівнем через інтерфейс прикладного програмування (API). Рівень інфраструктури складається з мережевих пристроїв (маршрутизаторів або комутаторів), які отримують команди від рівня керування та виконують їх.

Найбільш складні завдання в мережах SDN стоять перед рівнем управління. Вирішення цих завдань покладається на контролер, основним елементом якого є мережева операційна система.

Розглянемо особливості побудови контролера Ryu, протоколи та інтерфейси, функціональний склад елементів. Також побудуємо мережу SDN з використанням контролера Ryu та емулятора mininet, в цій топології потрібно перевірити працездатність контролера та провести тестування параметрів функціонування мережі, для цього проведемо тестування пропускної здатності каналів зв'язку у напрямку від h11 до h9. Для цього будемо передавати UDP трафік при різній пропускній здатності каналів зв'язку і подивимося на поведінку контролера при зміні пропускної здатності.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. На сьогоднішній день ведеться досить багато досліджень та розробок що до побудови та викорис-

тання даної технології в проектах. Різні автори пропонують дуже багато рішень що до використання даної технології в яких одна з найбільших проблем це визначити який контролер краще використати в тих чи інших умовах.

Опубліковано ряд документів, що описують принципи побудови і функціонування мереж SDN.

У роботі [1–4] розглянуто загальні вимоги, системні підходи для архітектури мереж SDN. Наведено приклади структурної схеми загального виду контролерам SDN, також розглянуто різновиди контролерів та описано компоненти та структурні схеми контролерів та порівняльна характеристика ідеалізованою структурною схемою мережі SDN.

[5] У цьому документі представлено як порівняння на основі функцій, так і аналіз продуктивності найбільш часто використовуваних реалізацій контролерів Ryu та POX. Порівнюється їх пропускна здатність і затримка в мережевих топологіях на основі простого дерева, повного дерева та традиційної IP-мережі. Представлено що продуктивність контролера Ryu/POX залежить від багатьох різних факторів: апаратного забезпечення контролера та конфігурації алгоритму керування, базової мережевої інфраструктури, кількості комутаторів OpenFlow, кількості хостів, кількості потоків.

[6] У цьому документі аналізується оцінка продуктивності через контролер RYU, враховуючи один комутатор OpenFlow і три вузли. Для трьох різних шляхів між вузлами ми отримали результат після обширного дослідження моделювання, яке оцінювалося за параметрами пропускної здатності, часу проходження, тремтіння та втрати пакетів.

У роботах [7–11] описано основні компоненти та характеристики контролера Ryu. Також відображено архітектуру контролера та загальні принципи його роботи. Написано програму Ryu, яка змусить комутатори OpenFlow працювати як комутатори рівня 2. Відображено перспективи розвитку даного контролера та його майбутню популярність.

[12] У цьому дослідженні пропонується архітектура для ефективного передачі даних датчиків у мережах IoT на основі SDN. У запропонованій моделі було розраховано середню втрату пакетів і затримку, а також досліджено зміни відповідно до кількості перемикань і кількості переходів. Для ефективного комунікації було помічено, що кількість переходів була найефективнішою змінною, але кількість переходів не мала лінійної залежності від загальної кількості комутаторів у мережі. Розташування датчиків виявилось важливим для ефективного зв'язку. Рекомендовано використо-

увати мережеві моделі, розробляти послуги IoT найкращим чином, контролювати мережу для втручання в різні ситуації, розробляти мережу за допомогою повномасштабного моделювання та роботи необхідні виправлення.

У роботі [13] наведено загальні характеристики по вибраним критеріям таким як архітектура, модульність, мова програмування, масштабованість, інтерфейси, стійкість та інші. На основі даних критеріїв розглянуто найпопулярніші контролери (Open Network Operation System (ONOS), OpenDayLight (ODL), OpenKilda, Ryu and Faucet) та порівняння їх між собою оцінкою та відображенням результатів в таблиці.

Метою статті є розкриття особливостей побудови контролера Ryu, опис позитивних та негативних сторін в порівнянні з іншими контролерами та спроба побудувати мережу в емуляторі mininet з використанням даного контролера та зняти характеристики пропускної здатності при різних типах навантаження.

Виклад основного матеріалу. Як і у випадку з більшістю платформ, існують компроміси, які слід враховувати при порівнянні централізованої, тісно пов'язаної площини керування з децентралізованим, масштабованим і слабо пов'язаним альтернативним контролером SDN.

Централізовані архітектури, такі як ONOS і ODL, як правило, легші в обслуговуванні та забезпечують меншу затримку між тісно пов'язаними південними API і північними API. Однак із збільшенням масштабу централізовані контролери можуть стати вузьким місцем. У контексті SD-WAN це може збільшити затримку рівня керування, але його можна пом'якшити в розподіленій архітектурі.

Розподілені архітектури, як в контролерах OpenKilda та Faucet, як правило, складніші для підтримки та розгортання, але можуть дозволити платформі ефективніше масштабуватись. Завдяки відокремленню обробки трафіку, телеметрії та південного інтерфейсу кожну функцію можна масштабувати незалежно, щоб уникнути вузьких місць продуктивності. Крім того, стають життєздатними спеціалізовані інструменти для роботи з великими наборами даних, базами даних часових рядів або масштабним обчисленням шляху без негативного впливу на продуктивність південного протоколу.

Ryu відрізняється від інших варіантів, хоча, маючи базовий набір програм, які запускаються як «платформа», його краще розглядати як набір інструментів, за допомогою якого можна створити функціональність контролера SDN.

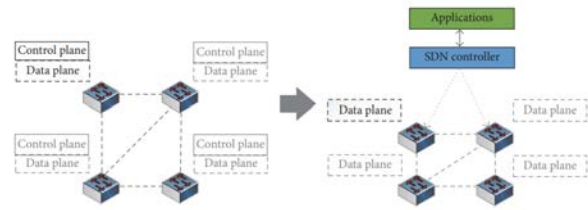


Рис. 2 Приклад розподіленого та централізованого управління мережею SDN

Модульність і розширюваність

Модульність кожного контролера залежить від дизайну та мов програмування. Такі платформи, як ONOS і ODL, мають вбудовані механізми для підключення кодових модулів за рахунок централізації обробки для кожного контролера. Ці два контролери на основі Java використовують переваги контейнерів OSGi для завантаження пакетів під час виконання, що дозволяє дуже гнучкий підхід до додавання функціональності.

Контролери на основі Python, такі як Ryu, надають чітко визначений API для розробників, щоб змінити спосіб керування та налаштування компонентів.

Додавання функціональності до Faucet і OpenKilda досягається шляхом модифікації систем, які використовують їхні північні інтерфейси, наприклад кластер Apache Storm або еквівалент. Це забезпечує додаткову гнучкість використання різних інструментів і мов залежно від проблеми, що вирішується. Крім того, збільшення складності взаємодії на північ не впливає безпосередньо на SDN.

Масштабованість

З розглянутих варіантів тільки ONOS і ODL містять внутрішню функціональність для підтримки кластера. Кожна з цих платформ підтримується розподіленим сховищем даних, яке поділяє поточний стан SDN і дозволяє контролерам перемикатися після відмови у випадку розділу кластера. З появою нових версій кожного з контролерів ця функціональність, схоже, розвивається.

OpenKilda підходить до масштабованості кластера за модульним принципом. У той час як Floodlight використовується як південний інтерфейс для інфраструктури комутатора, відповідальність за PCE і обробку телеметрії переміщується на північ у повністю окремий кластер на основі Apache Storm. Кожен екземпляр Floodlight є ідемпотентним і не вимагає спільного використання стану. Кластер Apache Storm за своєю конструкцією є горизонтально масштабованим і дозволяє збільшити пропускну здатність шляхом додавання вузлів.

Ryu, і Faucet не мають внутрішньої можливості кластеризації та потребують зовнішніх інструментів, таких як Zookeeper, для розподілу бажаного стану. На обох цих платформах додаткові екземпляри контролера можна запускати незалежно, якщо резервна конфігурація залишається ідентичною. Функціональність PCE для цих контролерів може бути переміщена до екземпляра у формі модулів або реалізована подібним чином до OpenKilda, за підтримки обраного кластера обробки.

У міру того, як масштаб SDN зростає, стає неможливим для одного локалізованого кластера обробляти навантаження від кожного комутатора в мережі. Залишаючи осторонь географічний розподіл контролерів, розбиття мережі на менші логічні островці зменшує потребу в єдиному кластері, орієнтованому на південь, для масового масштабування. Завдяки такому дизайну координація між островами стає критичною, і хоча централізований перегляд мережі все ще потрібний, відсутність PCE та обробки телеметрії не повинно впливати на стабільність площини даних після налаштування потоків.

Ryu, Faucet, ODL і ONOS прагнуть масштабувати таким чином, включаючи власні можливості маршрутизації BGP для координації потоків трафіку між островами SDN. Універсальний PCE і обробку телеметрії потрібно буде розробити для кожного з цих випадків з OpenKilda, що забезпечує робочу еталонну архітектуру для досягнення цього. Через стан документації для OpenKilda потрібно буде розробити BGP.

Інтерфейси

З огляду на майбутні вимоги сумісності для керування на південь, ONOS, ODL і Ryu включають протоколи, окрім OpenFlow. P4, Netconf і OF-Config можуть увімкнути додаткові апаратні параметри комутатора, якщо це буде потрібно.

Північний API виявляється однією з ключових відмінностей між пропонованими платформами. ONOS і ODL пропонують найбільший набір північних інтерфейсів із gRPC і RESTful API (серед інших), що робить їх найпростішими для інтеграції. Ryu та OpenKilda пропонують обмежений RESTful порівняно з ONOS та ODL. Faucet використовує зовсім інший підхід до застосування змін, покладаючись на файли конфігурації для відстеження планованого стану системи замість миттєвих викликів API. Цей підхід вимагатиме зовнішніх інструментів для динамічного застосування конфігурації, але відкриває SDN для адміністрування за допомогою добре зрозумілих конвеєрів CI/CD і тестового обладнання.

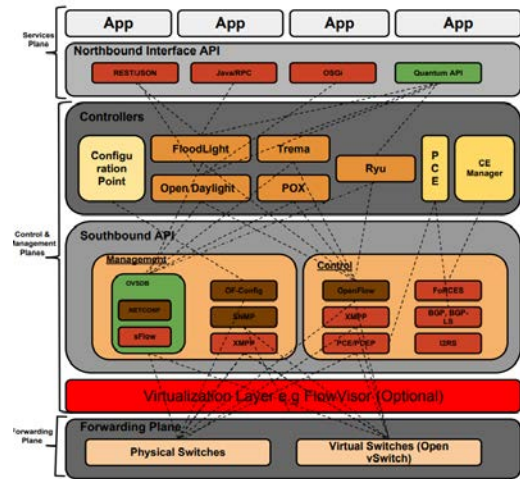


Рис. 3. Інтерфейси контролерів SDN

Телеметрія

Однією з основних проблем із підтримкою SDN є отримання та використання будь-якої доступної телеметрії для визначення стану системи та допомоги у вирішенні проблем. З цього приводу ODL не має функціональних можливостей, оскільки телеметрія все ще є експериментальним модулем в останній версії. ONOS має модулі, які дозволяють використовувати телеметрію через Grafana або InfluxDB.

Faucet може експортувати телеметрію в файли журналу Influxdb, Prometheus або плоский текст. Незважаючи на те, що Prometheus зберігає дані локально, його також можна об'єднати, що забезпечує централізоване агрегування та обробку подій, зберігаючи при цьому локальний кеш для обробки збоїв у обробці вгорі та обслуговування.

OpenKilda використовує Storm, який надає систему обчислень, яку можна використовувати для аналітики в реальному часі. Storm передає дані часових рядів до OpenTSDB для зберігання та аналізу. Neo4j, платформа для аналізу та візуалізації графіків, яка спочатку надавала функції PCE.

Ryu не надає жодної функції телеметрії. Це потрібно забезпечити за допомогою зовнішніх інструментів.

Стійкість

Платформи ONOS і ODL реалізують рідну кластеризацію як частину своїх відповідних пропозицій. ONOS і ODL забезпечують відмовостійкість в системі з непарною кількістю контролерів SDN. У разі виходу з ладу головного вузла новий лідер буде обраний, щоб взяти під контроль мережу. Механізм вибору лідера дещо відрізняється в цих двох контролерах, тоді як ONOS зосереджується на остаточно узгодженому ODL, зосередженому на високій доступності.

Решта контролерів (OpenKilda, Ryu та Faucet) не мають вбудованого механізму кластеризації, натомість покладаються на зовнішні інструменти для підтримки доступності. Це спрощує архітектуру контролерів і звільняє їх від накладних витрат на підтримку розподілених баз даних для інформації про стан. Висока доступність досягається шляхом запуску кількох ідентично налаштованих екземплярів або одного екземпляра, керованого зовнішньою структурою, яка виявляє та перезапускає несправні вузли.

Для Ryu Zookeeper може забезпечити відмовостійкість для моніторингу контролерів, щоб виявити збій контролера та стан шардингу між членами кластера. Зокрема для Faucet, який призначений для розміщення в розподіленій спільній SDN і керування ним за допомогою статичних конфігураційних файлів, перезапуск контролера є швидкою, стабільною вправою, яка не залежить від інфраструктури вищестоящого зв'язку після написання конфігурації.

Мова програмування

ONOS, ODL і OpenKilda написані на Java, для якої на ринку є багато ресурсів для розробки, з хорошою супровідною документацією та доступними бібліотеками. Хоча використання Java не слід розглядати як негатив, процеси Java можуть мати тенденцію бути важкими та вимагати керування ресурсами та конфігурацією, щоб підтримувати їх економічністю та швидко реагувати.

Ryu та Faucet написані мовою Python, яка добре підтримується, і має активну спільноту, що розробляє фреймворк. Документація стисла та технічна, спрямована на розробників, щоб максимально збільшити корисність системи. Python не є швидкою мовою та має невід'ємні обмеження через використання як динамічних представлень типів, так і обмежених багатопоточних можливостей (у порівнянні з Java, Golang або C++).

Controller	Programming language	Northbound APIs
Pox	Python	ad-hoc
Ryu	Python	REST
Nox	C++	ad-hoc
Floodlight	Java	Rest, Java, RPC, and Quantum
Beacon	Java	ad-hoc
OpenDaylight	Java	REST, RESTCONF, XMPP and NETCONF
ONOS	Java	REST and Neutron

Рис. 4. Контролер SDN і мови програмування

Спільнота

І ODL, і ONOS виграють від великих спільнот розробників і користувачів під прапором Linux Foundation Networking. Багато великих міжнародних гравців беруть участь у розробці та управлінні

цими проектами, що з часом може збільшити довговічність і безпеку. Можливий недолік полягає в тому, що, як і в будь-якому великому проекті, є багато голосів, які намагаються бути почутими, і на стабільність може вплинути швидкість роботи. Це траплялося з подібними проектами, такими як OpenStack, у найближчому минулому.

OpenKilda – це невелика, але активна спільнота, яка може обмежити підтримку, швидкість і функції платформи. OpenKilda потребує вашої підтримки – спілкуйтеся з нами, щоб взяти участь.

Між цими двома крайнощами знаходяться RYU і Faucet. Обидва цільові контролери добре підтримуються. Завдяки новому характеру галузі, обидва варіанти мають світле майбутнє, з більш простим, раціональним підходом до змін подання та тестування.

Таблиця оцінювання

На основі наведених вище критеріїв ми оцінили кожен продукт за кожним зваженим критерієм. Кожному критерію оцінки було надано максимальну кількість балів відповідно до важливості характеристики і впливу її на розвиток, стабільність і працездатність контролера, наприклад:

- OpenFlow Support – протокол управління процесом обробки даних, що передаються мережею передачі даних маршрутизаторами і комутаторами, що реалізує технологію програмно-конфігурованої мережі. Підтримка протоколів OpenFlow являється одним з важливих факторів на сьогодні.

- Northbound API – є сполучною ланкою між програмами та контролером SDN. Програми можуть повідомляти мережі, що їм потрібно (дані, сховище, пропускна здатність тощо), і мережа може надавати ці ресурси або передавати те, що вона має.

- Southbound API – полегшують контроль над мережею та дозволяють контролеру SDN динамічно вносити зміни відповідно до вимог і потреб у реальному часі.

- Мова програмування – даний критерій впливає на розвиток контролерів, адже це на пряму впливає на швидкість розробки нових можливостей та підтримки стабільності коду самого контролера.

- Та інше...

Відповідно до прикладу наведеного вище було оцінено різні критерії та надано їм відповідні бали для оцінки. Максимальний бал який може набрати контролер буде складати 100 балів і кожній характеристиці відповідно до її впливу на контролер надано відповідна кількість балів для

оцінки контролера. В таблиці наведено кількість балів які отримав кожен контролер відповідно до максимуму балів кожної характеристики та виведено загальну кількість балів.

Результати наведено нижче:

Criteria	Weight	ONOS	ODL	OK	Ryu	Fauzet
OpenFlow Support	20.0	20.0	19.0	12.0	20.0	20.0
Northbound API support	20.0	20.0	20.0	12.0	16.0	8.0
Southbound API support	10.0	10.0	10.0	6.0	8.0	8.0
Programming Language	5.0	4.0	4.0	4.5	4.5	4.5
Core Components features / services	5.0	4.5	4.5	3.5	2.0	3.5
Native Clustering Capabilities	10.0	9.0	7.0	10.0	2.0	5.0
Typical Architecture	3.0	2.7	2.4	2.7	2.4	2.7
Horizontal Scalability	5.0	3.5	3.0	4.5	1.0	4.0
Vertical Scalability	5.0	3.5	3.0	5.0	4.5	0.5
Extensibility	2.0	1.8	1.6	1.8	1.8	1.5
Community Size & Partnerships	5.0	4.5	4.5	1.0	4.5	3.5
Resilience and Fault Tolerance	3.0	4.0	3.0	4.5	4.0	4.5
Operations Support	5.0	4.5	2.5	4.0	2.5	3.5
Weighted Score	100	92	84.5	71.5	73.2	69.3

Рис. 5. Оцінка контролерів SDN за критеріями

Ці зусилля, витрачені на дослідження поточних платформ програмно-визначених мережевих контролерів (SDN), можуть бути використані, щоб надати користувачам уявлення про доступні контролери SDN з відкритим кодом. Це може допомогти їм вибрати правильний контролер SDN для своєї платформи, який відповідає дизайну мережі та вимогам.

Відповідно до таблиці ми можемо спостерігати позитивні і негативні сторони контролера Ryu відповідно в порівнянні його з іншими контролерами, та перспективні можливості його розвитку.

Якщо ми розглянемо характеристики саме Ryu то відповідно до таблиці ми можемо побачити такі позитивні якості:

- OpenFlow Support – контролер Ryu підтримує протокол OpenFlow. Цей протокол відповідає за управління процесом обробки даних, що передаються мережею передачі даних, маршрутизаторами і комутаторами, що реалізує технологію програмно-конфігурованої мережі. Підтримка протоколів OpenFlow являється одним з важливих факторів на сьогодні.
- Вихідний код Ryu Controller розміщений на GitHub і керується та підтримується відкритою спільнотою Ryu. Завдяки новому характеру галузі, даний контролер має світле майбутнє, з більш простим, раціональним підходом до змін подання та тестування.
- Підтримка Northbound / Southbound API – дані арі полегшують контроль над мережею та дозволяють контролеру SDN динамічно вно-

сити зміни відповідно до вимог і потреб у реальному часі.

Це один із контролерів SDN, спеціально розроблений для забезпечення гнучкості мережі та управління вищою швидкістю трафіку. Ryu включає чітко визначені програмні компоненти разом з API.

Компонентна складова Ryu контролера SDN

Ryu Controller – це відкритий контролер мережі (SDN), призначений для підвищення гнучкості мережі за рахунок посилення управління та адаптації способів обробки трафіку. В загальному, контролер SDN – це мозкова середовище SDN, що передає інформацію про комутатори та маршрутизатори за допомогою південних API, а також про програми та бізнес-логіку за допомогою північних API. Контролер Ryu підтримує NTT і також розвертається в обласних центрах обробки даних NTT.

Контролер Ryu надає програмні компоненти разом із певними інтерфейсами прикладних програм (API), які сприяють розробникам створення нових додатків керування та контролю мережі. Цей компонентний підхід допомагає організаціям налаштувати розвертання відповідно до своїх конкретних потреб; Розробники можуть швидко і легко змінити існуючі компоненти або видалити свої власні, щоб базовий набір відповідав змінним вимогам їх програм.

Вихідний код Ryu Controller розміщений на GitHub і керується та підтримується відкритою спільнотою Ryu. OpenStack, який веде відкриту співпрацю, спрямовану на розробку хмарної операційної системи, яка може контролювати обчислювальні сховища та мережеві ресурси організації, підтримує розгортання Ryu як мережевий контролер.

Весь код Ryu повністю написаний на Python доступний під ліцензією Apache 2.0 і відкритий для всіх. Контролер Ryu підтримує протоколи управління мережею NETCONF і OF-config, а також OpenFlow, який є одним з перших стандартів зв'язку SDN, що найбільш широко використовуються. Він також підтримує розширення Nicira.

ІТ-адміністратори пишуть спеціальні програми, які повідомляють контролеру Ryu, як управляти комутаторами та маршрутизаторами. Контролер Ryu може використовувати OpenFlow або інші протоколи для взаємодії з площиною пересилання (комутатори та маршрутизатори) для зміни того, як мережа оброблятиме потоки трафіку. Він був протестований та сертифікований для роботи з рядом комутаторів OpenFlow, включаючи Open vSwitch та пропозиції від Centec, Hewlett Packard, IBM та NEC.

Як і будь-який контролер SDN, Ryu також може створювати та надсилати повідомлення OpenFlow, прослуховувати асинхронні події, такі як `flow_removed`, а також аналізувати й обробляти вхідні пакети. На малюнку 2 нижче зображено компонентну складову фреймворку контролера Ryu:

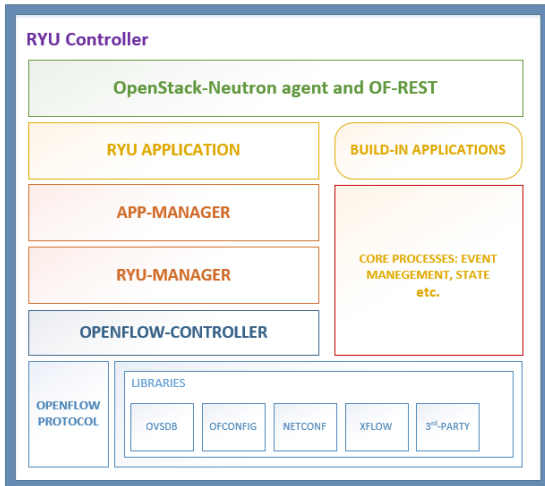


Рис. 6. Функціональна схема контролера RYU

Давайте розглянемо деякі важливі компоненти:

Ryu Libraries. Ryu має вражаючу колекцію бібліотек, починаючи від підтримки відкритих «південних» протоколів SBI і закінчуючи різними операціями обробки мережесих пакетів. Що стосується протоколів SBI, Ryu підтримує OF-Config, Open vSwitch Database Management Protocol (OVSDB), NETCONF, XFlow (Netflow і Sflow) та інші сторонні протоколи.

Протоколи Netflow і Sflow (XFlow) підтримують вибірку та агрегацію пакетів, які в основному використовуються для вимірювання мережевого трафіку.

Протокол OVSDB використовує виклики JSON-RPC для керування фізичним або віртуальним комутатором, який підтримує OVSDB.

У OpenFlow є протокол-розширення OF-CONFIG, що дозволяє керувати основними налаштуваннями комутаторів, такими як черги та стани портів.

NETCONF надає механізми встановлення, керування та видалення конфігурації мережесих пристроїв за допомогою віддаленого виклику процедур RPC. NETCONF використовує XML як засіб надання конфігурації і як формування повідомлень протоколу, який реалізується поверх транспортного.

Third Party protocol – це клієнт-серверний протокол із трьома типами примітивів: Request (використовується клієнтом), Notify (використовується сер-

вером для надсилання інформації про стан клієнту), Responses (надсилається як відповідь на запит).

Бібліотеки сторонніх розробників включають прив'язку Open vSwitch Python, бібліотеку конфігурації Oslo та бібліотеку Python для клієнта NETCONF. Бібліотека пакетів Ryu допомагає аналізувати та створювати різні пакети протоколів, наприклад VLAN, MPLS, GRE тощо.

OpenFlow Protocol. Протокол управління процесом обробки даних, що передаються по мережі передачі даних маршрутизаторами і комутаторами, реалізуючий технологію програмно-конфігурованої мережі. Ryu підтримує протокол OpenFlow до останньої версії 1.4. Він містить бібліотеку кодера та декодера протоколу OpenFlow.

OpenFlow Controller. Крім того, одним із ключових компонентів архітектури Ryu є контролер OpenFlow, який відповідає за керування перемикачами OpenFlow, які використовуються для налаштування потоків, керування подіями тощо. Контролер OpenFlow є одним із внутрішніх джерел подій в архітектурі Ryu.

Managers and Core-Processes. Менеджер Ryu є основним виконуваним файлом. При запуску він прослуховує вказану IP-адресу (наприклад, 0.0.0.0) та вказаний порт (за замовчуванням 6633). Після цього будь-який комутатор OpenFlow (апаратний, Open vSwitch або OVS) може підключитись до диспетчера Ryu. Диспетчер програм є основним компонентом всіх програм Ryu. Усі програми успадковуються від класу RyuApp диспетчера додатків. Компонент ядра процесу в архітектурі включає управління подіями, обмін повідомленнями, управління станом в пам'яті і т. д. Цікаво, що служба обміну повідомленнями Ryu підтримує компоненти, розроблені іншими мовами.

Openstack Neutron agent. На рівні API Ryu включає плагін Openstack Neutron, який підтримує як накладення на основі GRE (протокол тунелювання мережесих пакетів), так і конфігурації VLAN. Ryu також підтримує інтерфейс REST для своїх операцій OpenFlow. Крім того, використовуючи WSGI (фреймворк для з'єднання веб-додатків і веб-серверів на Python), можна легко ввести в програму нові REST API.

APP Manager. Ryu поширюється з кількома додатками, такими як `simple_switch`, маршрутизатор, ізоляція, брандмауер, тунель GRE, топологія, VLAN і т. д. Програми Ryu є однопотокові об'єкти, що реалізують різні функції. Програми Ryu надсилають одна одній асинхронні події. Кожна програма Ryu має чергу прийому подій, яка в основному являє собою FIFO для збере-

ження порядку подій. Крім того, кожен додаток включає потік для обробки подій з черги. Основний цикл потоку витягує події з черги прийому та викликає відповідний обробник подій. Отже, обробник подій викликається в контексті потоку обробки подій, який працює блокуючим чином, тобто коли обробнику подій передається управління, подальші події для Ryu програми не будуть оброблятися до тих пір, поки управління не буде повернено. Програма Ryu може викликати подію або отримувати подію. Щоб викликати подію, програма Ryu викликає відповідні методи `ryu.base.app_manager RyuApp`, наприклад `API send_event` або `send_event_to_observers`.

Архітектура RYU Controller

Контролер RYU забезпечує компоненти програмного забезпечення з чітко визначеними програмними інтерфейсами прикладних програм (API), які полегшують розробникам створення нових додатків для керування та керування мережею.

Контролер RYU SDN має три рівні. Верхній рівень складається з бізнес-програм і програм мережевої логіки, відомих як прикладний рівень. Середній рівень складається з мережевих служб, відомих як рівень керування або структура SDN, а нижній рівень складається з фізичних і віртуальних пристроїв, відомих як рівень інфраструктури. Середній рівень розміщує північні та південні API. Контролер надає відкритий північний API, такий як API керування Restful, REST, API для Quantum, визначений користувачем API через REST або RPC, які використовуються програмами. RYU надає групу компонентів, таких як OpenStack Quantum, Firewall, OFREST тощо, корисних для програм SDN. Метою цих програм є збір мережевих даних за допомогою контролера, виконання аналітики за допомогою алгоритмів, а потім оркестрування нових правил за допомогою контролера. Південний інтерфейс здатний підтримувати кілька протоколів, таких як OpenFlow, Netconf, OF-config тощо. RYU використовує OpenFlow для взаємодії з площиною пересилання (комутаторами та маршрутизаторами), щоб змінити спосіб обробки потоків трафіку в мережі. Він був протестований і сертифікований для роботи з кількома комутаторами OpenFlow, включаючи OpenvSwitch і пропозиції від Centec, Hewlett Packard, IBM і NEC.

Структура Ryu відрізняється від інших рішень тим, що вона надає просту допоміжну інфраструктуру, яку користувачі платформи повинні написати для використання на власний розсуд. Хоча для цього потрібний досвід розробки, це

також забезпечує повну гнучкість рішення SDN. Існуючі компоненти можна швидко і легко оновлювати і об'єднувати в існуючі мережі, щоб задовольнити потреби різних програм, що змінюються, використовуючи ці компоненти. Завдяки своїм характеристикам Ryu є відмінним рішенням для невеликих комерційних та експериментальних застосувань. Цей рівень керування дозволяє створювати програми та модулі, оскільки він розроблений на Python.

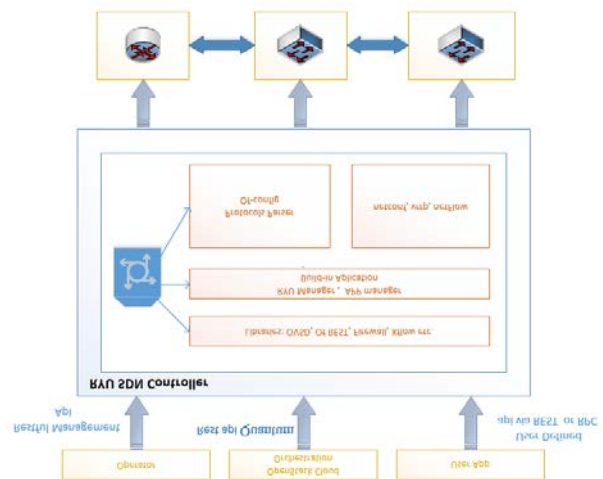


Рис. 7. Архітектура RYU Controller

Оскільки Mininet являється загальною платформою-емулятором, то при запуску мережі без зазначення мережевих параметрів вона не відповідає дійсній SDN мережі. Тому з початку потрібно зазначити низку параметрів і провести декілька кроків налаштування, щоб мережа відповідала вимогам реальної SDN мережі. В нашому випадку буде використовуватись топологія мережі (рис. 1), яка написана на вищому рівні Mininet API (Python API). Топологія Mininet описана в окремому файлі розширення ".py" з залученням сторонніх бібліотек для більш гнучких налаштувань мережі. В роботі була використана бібліотека TCLink, яка надає змогу задавати пропускну здібність, затримку, джиттер у каналах зв'язку, а також RemoteController для описання ONOS контролера, якій в подальшому буде підключений до мережі в якості централізованого органу управління.

Спробуємо побудувати топологію SDN мережі в емуляторі mininet з використанням контролера Ryu та провести тестування параметрів функціонування мережі, для цього проведемо тестування пропускну здатності каналів зв'язку у напрямку від h11 до h9. Для цього, організована передача UDP трафіку при різній пропускну здатності каналів зв'язку.

- Сервер: `iperf -s -u -p 15 -i 1`
- `iperf -c 10.0.0.9 -p 15 -n 500M -b 10M -u`

У ході проведення досліду було знято часові діаграми швидкості передачі UPD трафіку. Крок підвищення пропускної здатності у лініях зв'язку становить: 10%, 50%, 100% від максимально заданої швидкості передачі лінії зв'язку. Тобто 10, 50, 100 Мбіт/с, відповідно. Часові діаграми наведені на рис. 2.

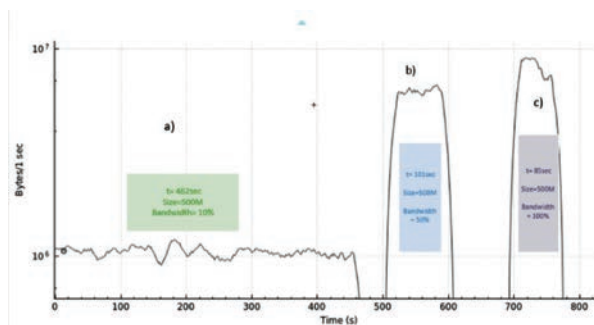


Рис. 12. Швидкість передачі трафіку каналом зв'язку при: а) пропускна здатність 10%; б) пропускна здатність 50%; в) пропускна здатність 100%

Проведені дослідження дозволяють визначити деякі особливості. Побудова мережі SDN довільної топології вимагає додаткового написання програмного коду на мові python, а також використання дефольного контролера Ryu, який написаний на мові python і можна скачати з їх github репозиторія. Це дає можливість створювати необхідні зв'язки як між елементами мережі, так і між елементами керування мережею.

Висновки. Ryu – це відкритий контролер мережі (SDN), призначений для підвищення гнучкості мережі за рахунок посилення управління та адаптації способів обробки трафіку. Контролер Ryu надає програмні компоненти разом із пев-

ними інтерфейсами прикладних програм (API), які сприяють розробникам створення нових додатків керування та контролю мережі. Цей компонентний підхід допомагає організаціям налаштувати розвертання відповідно до своїх конкретних потреб; Розробники можуть швидко і легко змінити існуючі компоненти або видалити свої власні, щоб базовий набір відповідав змінним вимогам їх програм. У майбутньому планується вивчити більше контролерів, щоб зменшити їх вплив на продуктивність SDN.

В даній роботі було наведено порівняльну характеристику даного контролера з іншими та визначено його позитивні якості в порівнянні з іншими.

- Підтримка протоколу OpenFlow.
- Підтримка Northbound / Southbound API.
- Вихідний код Ryu Controller розміщений на GitHub і керується та підтримується відкритою спільнотою Ryu.

• Ryu контролер написаний на мові програмування Python яка підтримується і використовується великою спільнотою що дає змогу залучити розробників в спільноту для покращення функціональності і внесення нових ідей в реалізацію даного контролера.

В роботі, використовуючи побудовану топологію та перераховані вихідні дані, було знято часові діаграми при навантаженні напрямку зв'язку. Відображені результати показали, що при пропускній спроможності лінії зв'язку до 50%, передача відбувається з постійною швидкістю без суттєвих змін, що не можна сказати при пропускній спроможності більше 50%. В такому випадку, характер швидкості непередбачуваний, хоча в обох випадках, переданий об'єм трафіку доставляється без втрат. Треба відмітити суттєвий недолік проведених досліджень на базі цих програмних продуктів.

В роботі, використовуючи побудовану топологію та перераховані вихідні дані, було знято часові діаграми при навантаженні напрямку зв'язку. Відображені результати показали, що при пропускній спроможності лінії зв'язку до 50%, передача відбувається з постійною швидкістю без суттєвих змін, що не можна сказати при пропускній спроможності більше 50%. В такому випадку, характер швидкості непередбачуваний, хоча в обох випадках, переданий об'єм трафіку доставляється без втрат. Треба відмітити суттєвий недолік проведених досліджень на базі цих програмних продуктів.

Список літератури:

1. N. McKeown, "OpenFlow: Enabling Innovation in Campus Networks". in SDN: Software Defined Networks, O'Reilly Media, 2013, pp. 85-108. URL: <https://www.oreilly.com/library/view/sdn-software-defined/9781449342425/ch04.html>
2. Arshad, M. A. Khan, T. A. Zia, and U. Farooq, "Performance Evaluation of SDN Controllers in Wireless Network," URL: https://www.researchgate.net/publication/338071223_Performance_Evaluation_of_SDN_Controllers_in_Wireless_Network
3. F. Lahmar and F. Lahmar, "Controllers in SDN: A Review Report," URL: https://www.researchgate.net/publication/325706050_Controllers_in_SDN_A_Review_Report.
4. "SDN controller (software-defined networking controller)," TechTarget. URL: <https://www.techtarget.com/searchnetworking/definition/SDN-controller-software-defined-networking-controller>.
5. M. Ali and H. Shamim, "Performance Analysis of Ryu-POX Controller in Different Tree-Based SDN Topologies," URL: https://www.researchgate.net/publication/354230822_Performance_Analysis_of_Ryu_POX_Controller_in_Different_Tree-Based_SDN_Topologies.

6. M. Uddin, M. Ali, and M. A. Rahman, "Node to Node Performance Evaluation through RYU SDN Controller," URL: https://www.researchgate.net/publication/338703576_Node_to_Node_Performance_Evaluation_thruRYU_SDN_Controller/figures?lo=1&utm_source=google&utm_medium=organic
7. J. Hurwitz, "SDN Series Part IV: Ryu, a Rich Featured Open Source SDN Controller Supported by NTT Labs," URL: https://thenewstack.io/sdn-series-part-iv-ryu-a-rich-featured-opensource-sdn_controller-supported-by-ntt-labs/
8. "Comparison of Software Defined Networking (SDN) Controllers – Part 5: Ryu," Aptira. URL: <https://aptira.com/comparison-of-software-defined-networking-sdn-controllers-part-5-ryu/>.
9. "Topics related to Ryu SDN Controller," GitHub. URL: https://github.com/topics/ryusdn_controller
10. "Ryu SDN Framework Documentation," URL: <https://ryu.readthedocs.io/en/latest/>.
11. D. O’Riain, "RYU SDN Controller: Soft Testbed," URL: https://www.obriain.com/training/sdn/RYU_Soft_Testbed_v2.0.pdf
12. M. Ali, H. Shamim, and M. A. Rahman, "Implementation of an SDN-Based IoT Network Model for Efficient Transmission of Sensor Data," URL: https://www.researchgate.net/publication/337439497_Implementation_of_an_SDN_Based_IoT_Networ_Model_for_Efficient_Transmission_of_Sensor_Data
13. "Comparison of Software Defined Networking (SDN) Controllers – Part 7: Comparison and Product Rating," Aptira. URL: <https://aptira.com/comparison-of-software-defined-networking-sdncontrollers-part-7-comparison-and-product-rat>

Romanov O.I., Burlaka H.Yu. SDN NETWORK MANAGEMENT USING RYU CONTROLLER

To date, it has been found that the most difficult tasks in SDN networks are faced by the management level. Solving these tasks depends on the controller; the main element of which is the network operating system. This article discusses the construction features of the Ryu controller; protocols and interfaces, and the functional composition of elements. The comparative characteristics of this controller with others are presented and evaluated according to certain criteria, thanks to which you can get an overall picture of the positive and negative sides of this controller. This article reveals the principles of building a mininet network using this controller.

This article describes what the Ryu controller is, namely an open network controller (SDN), designed to increase network flexibility by strengthening management and adapting traffic processing methods. In general, an SDN controller is the brain of SDN, communicating information about switches and routers through southbound APIs, and applications and business logic through northbound APIs. The Ryu framework differs from other solutions in that it provides a simple supporting infrastructure, which users of the platform must write for use at their own discretion. While this requires development expertise, it also provides the full flexibility of an SDN solution. Existing components can be quickly and easily upgraded and integrated into existing networks to meet the changing needs of different applications using these components.

The article examines the components of the Ryu controller, its positive and negative sides in comparison with other controllers. Features of Ryu controller construction, protocols and interfaces, functional composition of elements are considered. An SDN network was also built using the Ryu controller and the mininet emulator; in this topology the performance of the controller was tested and the parameters of the network functioning were tested, for this the bandwidth of the communication channels in the direction from h11 to h9 was tested.

Key words: mininet, Ryu Controller, OpenFlow, ONOS, APP Manager, Ryu Libraries, bandwidth.

Сбоєв Р.Ю.

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

Могилевич Д.І.

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

АНАЛІЗ ФАКТОРІВ, ЩО ВПЛИВАЮТЬ НА ФУНКЦІОНАЛЬНУ СТІЙКІСТЬ ОБЛАДНАННЯ ЕЛЕКТРОННИХ КОМУНІКАЦІЙНИХ СИСТЕМ

На сьогоднішній день обладнання електронних комунікаційних мереж складається з двох взаємопов'язаних компонентів. Перший – це апаратна частина, а другий – програмна. Нормальне функціонування кожного з них має велике значення для ефективності мережі в цілому. Стаття присвячена аналізу факторів, що впливають на функціональну стійкість комунікаційного обладнання електронних комунікаційних систем. У статті визначено, що одними з основних понять, які характеризують здатність мережі виконувати свої завдання, є функціональна безпека та функціональна стійкість. Розкрито відмінності понять функціональної безпеки та надійності обладнання. З'ясовано, що функціональна безпека відрізняється від надійності тим, що в надійності розглядаються всі можливі відмови, тоді як функціональна безпека враховує лише ті, які можуть призвести до зриву функціонування певної системи.

Показано, що функціональна стійкість в контексті складної технічної системи, до якої відноситься обладнання електронних комунікаційних мереж, поєднує в собі властивості надійності, відмовостійкості, живучості та характеризує здатність об'єкта до підтримання працездатного стану за рахунок використання різних видів надмірності. Також коротко описано кожен з них, при цьому зосереджено увагу саме на часовій надмірності (резервуванні), оскільки електронні комунікаційні мережі є системами реального часу, що накладає ряд обмежень на часові рамки виконання завдань за призначенням цього типу мереж.

У статті наведено класифікацію відмов комунікаційного обладнання та розглянуто способи зменшення їх впливу за рахунок використання надлишковості. Доведено необхідність подальших досліджень за наведеним напрямком.

Ключові слова: функціональна стійкість, функціональна безпека, надійність, збої та відмови програмного забезпечення, обладнання електронних комунікаційних мереж.

Постановка проблеми. Сучасне обладнання електронних комунікаційних мереж (ОЕКМ) можна представити як складний апаратно-програмний комплекс (АПК), який складається з двох взаємопов'язаних компонентів: апаратного та програмного. Апаратна частина включає в себе різноманітну технічну інфраструктуру, таку як каналоутворююче та кінцеве обладнання, пристрої комутації, маршрутизації, мультиплексування та обладнання лінійних трактів. Програмна частина представляє собою набір програмних засобів (ПЗ), який включає в себе програмне забезпечення вищевказаних апаратних складових, правила і супутню документацію та дані, що стосуються функціонування ОЕКМ.

Водночас для опису показників якості функціонування ОЕКМ користуються термінами «функціональна безпека», «надійність», і «функціональна стійкість», які є взаємопов'язаними і використовуються як в контексті дослідження ОЕКМ загалом, так і системного ПЗ цих мереж, зокрема,

оскільки вони описують здатність системи залишатися працездатною і виконувати свої функції під впливом негативних чинників.

Основна відмінність між функціональною безпекою і надійністю полягає в тому, що надійність враховує всі можливі відмови, тоді як функціональна безпека стосується лише тих відмов, які можуть призвести до критичних збитків, що впливають на безпеку системи та втрату інформації користувачів, іноді навіть на самого користувача. Функціональна стійкість – більш комплексне поняття, яке включає в себе поняття надійності, живучості та відмовостійкості.

Для оцінювання ФС апаратної складової на теперішній час сформовано доволі широкий набір методів та інструментів. У той же час значення програмної складової поступово зростає внаслідок розвитку техніки й вимог до неї, і, відповідно, зросла складність і вразливість ПЗ внаслідок під дією зовнішніх і внутрішніх негативних впливів. Тепер постає завдання подальших досліджень

функціональної стійкості саме ПЗ ОЕKM за рахунок пристосування для цього наявних методів теорії надійності.

Аналіз основних досліджень і публікацій. Уперше поняття функціональної стійкості було введено професором Машковим О.А. та розширено в низці робіт вітчизняних авторів [1–5]. Саме в них сформовано основні принципи досягнення ФС складних технічних систем.

Метою статті є аналіз факторів, що впливають на функціональну стійкість ОЕKM.

Виклад основного матеріалу дослідження. Під функціональною стійкістю розуміють здатність системи виконувати свої функції впродовж заданого інтервалу часу за умови впливу на неї потоку експлуатаційних відмов, навмисних пошкоджень, втручання в обмін і обробку інформації, а також у разі помилок обслуговуючого персоналу [5].

Функціональна стійкість відноситься до власливості системи або ПЗ залишатися працездатною та виконувати свої функції незалежно від різних внутрішніх або зовнішніх впливів, таких як помилки в роботі, несправності обладнання, збої в програмах або кібератаки. Вона може бути досягнутою навіть за умови відмови якоїсь частини обладнання чи складової, головне – збереження працездатності системи й виконання неб задач за призначенням.

Функціональна стійкість є важливою характеристикою для багатьох систем, особливо для систем реального часу, які використовуються в критичних галузях, таких як медицина, фінанси, електронні комунікації й авіація.

Основна мета функціональної стійкості полягає в тому, щоб забезпечити, нормальний режим роботи системи, навіть якщо в ній виникають проблеми або під дією атаки, при цьому вона може автоматично або з мінімальним втручанням відновлювати свою роботу у випадку збоїв і відмов.

Водночас, зміни у якісному складі ОЕKM закономірно призводять до зміни вимог до функціонування системи зв'язку та елементів (вузлів зв'язку), що входять до її складу. Подібні зміни обумовлені такими факторами:

1) збільшенням обсягів інформації, що циркулює в системі зв'язку, викликане застосуванням сучасних багатофункціональних засобів її добування, обробки, передачі та зберігання;

2) скороченням часу на передачу та обробку інформації (до інформаційного обміну в масштабі реального часу), обумовленого необхідністю скорочення циклів управління для прийняття випе-

реджувальних рішень (особливо це стосується спеціальних ЕKM);

3) широким використанням посадовими особами пунктів управління автоматизованих систем управління та підсистем підтримки прийняття рішень, що зумовлюють необхідність конвергенції послуг електрозв'язку (мовлення, даних, мультимедіа).

При цьому перелік факторів, що впливають на ОЕKM доповнюються новими.

Відповідно, фактори, що впливають на функціональну стійкість системи або ПЗ систем, можна класифікувати на кілька категорій (рис. 1), які будуть розглянуті нижче.



Рис. 1. Фактори, що впливають на ФС

1. Внутрішні фактори.

- Архітектурні рішення: якість архітектури системи, включаючи розподілену архітектуру, забезпечення резервного копіювання та обробку помилок.

- Якість програмного забезпечення: якість коду, тестування, виявлення та виправлення помилок. Найбільш поширеним, та, відповідно, таким, що здійснює найбільший вплив (серед внутрішніх факторів) на ФС в електронних комунікаційних мережах є системне ПЗ обладнання, яке здійснює керуванням конкретним апаратним засобом, тому основну увагу необхідно приділяти ФС саме цієї складової. Також збитки від дефектів та помилок системного ПЗ можуть мати кумулятивний характер та проявлятися у певних відмовних ситуаціях, які впливають на надійність, і на ФС, відповідно.

- Моніторинг та логування: системи для відстеження стану системи та реєстрації подій та помилок.

- Конфігурація та управління ресурсами: ефективне управління ресурсами, такими як пам'ять, процесор та мережа.

2. Зовнішні фактори.

- Фізичне середовище: вплив фізичного середовища на обладнання, такий як перепади напруги, перепади температури, природні ката-

строфи, вогневе ураження, радіо-електронна боротьба тощо.

- Кіберзагрози: атаки на систему, такі як віруси, хакерські атаки, витік даних тощо.

- Навантаження: завантаження системи внаслідок зростання об'єму даних, які в ній циркулюють, що може призвести до перевантаження та зниження продуктивності.

3. До окремого виду належать адміністративні фактори, які поєднують в собі ознаки внутрішніх та зовнішніх.

- Політики та процедури: встановлені політики та процедури забезпечення безпеки та стійкості.

- Технічна підтримка та технічне обслуговування: якість технічної підтримки та відповідь на інциденти.

- Навчання та підготовка персоналу: навчання та підготовка персоналу для ефективного управління та відновлення системи.

Кожна з цих категорій факторів може впливати на ФС ПЗ ОЕKM та системи в цілому, і їх врахування при проектуванні, впровадженні та управлінні системою може допомогти забезпечити її безвідмовну роботу в різних умовах.

Для розуміння поняття ФС необхідно також розрізняти поняття «збій» і «відмова».

Згідно з [6] збій – самоусувна відмова або одноразова відмова, яку незначним втручанням усуває оператор. Тобто при його виникненні працездатний стан об'єкту зберігається.

Відмова ж – це подія, яка полягає у втраті об'єктом здатності виконувати потрібну функцію, тобто у порушенні працездатного стану об'єкта.

Існує також певна класифікація відмов [7]. Небезпечні відмови – призводять до втрати ФБ системи та/або до втрати її безпечного стану. Безпечні – призводять до помилкового відключення виходу і зупинки контрольованого технологічного процесу (помилкове спрацювання) (рис. 2).

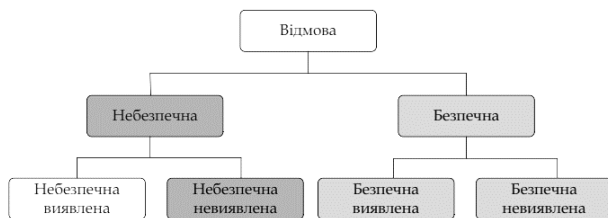


Рис. 2. Класифікація відмов

З точки зору надійності розглядаються всі вищезгадані типи відмов, з точки зору ФБ – тільки небезпечні невиявлені відмови. Оскільки надійність входить до поняття ФС, то необхідно врахувати усі види відмов.

Принципи реалізації функціональної стійкості систем, які вперше були виокремлені в роботах професора Машкова О.А. [1, 2, 4] полягають у виконанні наступних процедур:

- виявлення нештатної (відмовної) ситуації, пов'язаної з погіршенням якості функціонування внаслідок впливу дестабілізуючих чинників;

- ідентифікація нештатної ситуації;

- ухвалення рішення про відновлення процесу функціонування;

- парировання нештатної ситуації (відновлення функціонування) методом перерозподілу функцій і завдань між неушкодженими елементами).

Останній принцип досягається застосуванням у складній технічній системі (ЕКМ у тому числі) різних, уже існуючих видів надмірності (структурної, часової, інформаційної, функціональної, навантажувальної тощо) шляхом їх перерозподілу.

Тож надмірність в СЕКМ можна розділити на декілька видів, наведених нижче.

1. Структурна надмірність – включає в себе резервування компонентів системи (наприклад, серверів, комутаторів, мережевих ліній) з метою забезпечення надійності та ФС. Кожна сучасна СЕКМ будується за принципом резервування «1+1».

2. Часова надмірність (часовий резерв) – забезпечується наявністю достатнього часового проміжку для виконання операцій чи передачі даних. Є особливо важливою для систем, які мають строгі вимоги до часу виконання, тобто систем реального часу, таких як СЕКМ.

Систему з часовим резервуванням можна представити як сукупність вихідного об'єкта та резерву часу (рис. 3), при цьому резерв часу використовується після відмови об'єкта, для її компенсації.

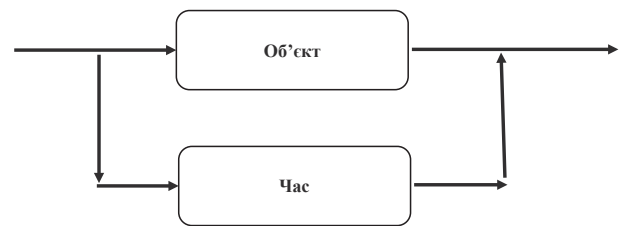


Рис. 3. Структура системи з часовим резервуванням

Резерв часу може бути використаний для відновлення працездатності об'єкта (системи) таким чином:

- перемиканням структурного резерву;
- шляхом виявлення елемента, що відмовив, і його заміни;

- повторним виконанням завдання.
- Резерв часу може створюватися за рахунок:
- збільшення виділеного оперативного часу;
 - збільшення продуктивності системи та її окремих пристроїв;
 - функціональної інерційності процесів, що протікають у системі (відмова елемента системи управління не відразу призведе до відмови в роботі керованого об'єкта).

Також існують системи з відновлюваним резервом часу, не відновлюваним резервом часу та з комбінованим резервом часу.

Резервування часу часто використовується для підвищення ефективності інших видів резервування і є передумовою застосування цих видів резервування.

3. Інформаційна надмірність – застосування завадостійкого кодування, яке забезпечує виявлення і виправлення помилок певного порядку, що забезпечує достовірну та своєчасну передачу даних через СЕКМ. Адже сутність будь-якого завадостійкого коду, без якого зараз неможливо уявити функціонування мережі зв'язку, полягає в додаванні додаткових перевірючих символів.

4. Функціональна надмірність – наявність додаткових функцій або можливостей в системі, які можуть бути активовані в разі потреби. Наприклад, мережі можуть мати можливість активувати додаткові брандмауери або VPN-з'єднання в разі збільшення обсягу трафіку або збільшення рівня загрози.

5. Навантажувальна надмірність – включає в себе резервну потужність і ресурси, які можуть бути використані в разі зростання навантаження на систему. Наприклад, дата-центри можуть мати додаткові сервери, які можна активувати під час періодів підвищеного навантаження.

Відповідно, для забезпечення ФС немає потреби в формуванні додаткових видів надмірності, а в сформуванні системи управління, яка здатна вчасно перерозподілити існуючі надмірності.

Фактично, функціональна стійкість складної системи може розглядатися, як властивість системи успішно завершити завдання при регламентованому числі змін у стані самої системи, тобто збереження її працездатності після прояву в ній допустимого числа збоїв (або відмов складової частини) та впливу зовнішніх негативних чинників.

При цьому на етапі проектування не потрібно вводити додаткову надмірність, а парирування наслідків позаштатних ситуацій здійснюється перерозподілом вже існуючих ресурсів. Задача полягає саме у виявленні існуючої надмірності та формуванні сигналів у потрібний момент на її перерозподіл. У цьому полягає принципова відмінність завдання забезпечення ФС від завдання побудови структурно надлишкових систем.

Також важливою особливістю функціонально стійких систем є їх здатність до поступової деградації на структурному рівні безпосередньо до повної відмови системи. Тобто така система почергово виключає із своєї структури елементи, які відмовили, одночасно перебудовує структуру, налаштовує параметри для пристосування до нових (більш обмежених) умов експлуатації.

Висновки. Отже однією з основних характеристик сучасних складних технічних систем (ЕКМ у тому числі) є функціональна стійкість – комплексне поняття, яке характеризує здатність системи залишатися працездатною під дією зовнішніх та внутрішніх факторів, що можуть призводити до збоїв та відмов. Її сутність полягає у здатності виконувати хоча б встановлений мінімальний обсяг своїх функцій при відмовах в програмній та (або) апаратній частинах ОЕКМ, а також впливів зовнішніх впливів, які передбачені умовами використання.

Функціональна стійкість досягається за рахунок використання різних видів надмірностей. Як наслідок мають бути сформовані відповідні методи й заходи компенсування нештатних ситуацій та перерозподілу надмірностей, які забезпечать ФС ОЕКМ.

Список літератури:

1. Артющин Л. М., Машков О. В., Сівов М. С. Теорія автоматичного керування. К.: КІВПС, 2000, 320 с.
2. Оцінка функціональної стійкості розподілених інформаційно-керуючих систем. Олег Машков, Олег Барабаш. Фізико-математичне моделювання та інформаційні технології, 2005, Вип.1, 157-163.
3. Барабаш О. В., Кравченко Ю. В. Функціональна стійкість — властивість складних технічних систем. Зб. наук. пр. НАОУ. Бюл. № 40. К.: НАОУ, 2002, с. 225-229.
4. Дурняк Б. В., Машков О. А., Косенко В. Р. Програмне забезпечення для математичного моделювання функціонально стійких інформаційно-керуючих комплексів динамічних об'єктів. Моделювання та інформаційні технології: зб. наук. праць. Київ: ПІМЕ ім. Г. Є. Пухова НАН України, 2010. Вип. 57. С. 201–217.
5. Функціональна стійкість інформаційних мереж за наявності обмеженої апріорної інформації про надійність, С. М. Іщераков, С. В. Прокопов, Ю. В. Каргаполов, Ю. В. Березовська. Зв'язок, № 6, 2020, ISSN 2412-907, DOI: 10.31673/2412-9070.2020.069966.

6. ДСТУ 2860-94. Надійність техніки. Терміни та визначення. К.: Держстандарт України, 1994. 36 с. URL: https://dnaop.com/html/2273/doc_ДСТУ_2860-94.
7. Є. Бабешко, О. Ілляшенко та В. Харченко. Функційна безпека індустріальних систем Стандарт ІЕС 61508, Київ, 2019. URL: <https://tk185.appau.org.ua/whitepapers/aCampus-whitepaper-IEC-61508+++pdf>.

Sboiev R.Yu., Mogylevych D.I. ANALYSIS OF FACTORS AFFECTING THE FUNCTIONAL STABILITY OF ELECTRONIC COMMUNICATION SYSTEM EQUIPMENT

Today, the equipment of electronic communication networks consists of two interconnected components. The first is the hardware part, and the second is the software part. The normal functioning of each of them is of great importance for the efficiency of the network as a whole. The article is devoted to the analysis of factors affecting the functional stability of communication equipment of electronic communication systems. The article defines that one of the main concepts characterizing the network's ability to perform its tasks is functional security and functional stability. The differences between the concepts of functional safety and equipment reliability are revealed. It was found that functional safety differs from reliability in that reliability considers all possible failures, while functional safety takes into account only those that can lead to the failure of a certain system.

It is shown that functional stability in the context of a complex technical system, which includes the equipment of electronic communication networks, combines the properties of reliability, failure resistance, survivability and characterizes the ability of the object to maintain an operational state due to the use of various types of redundancy. Each of them is also briefly described, while the focus is on time redundancy (redundancy), since electronic communication networks are real-time systems, which imposes a number of restrictions on the time frames for performing tasks for the purpose of this type of network.

The article provides a classification of communication equipment failures and considers methods of reducing their impact through the use of redundancy. The need for further research in this direction has been proven.

Key words: *functional stability, functional safety, reliability, failures and failures of software, equipment of electronic communication networks.*

Соколов К.А.

Національний технічний університет України

«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

ВІЗУАЛЬНЕ ВИЯВЛЕННЯ ТА ВІДСТЕЖЕННЯ МАЛОГАБАРИТНИХ РУХОМИХ ОБ'ЄКТІВ НА ОСНОВІ ФУНКЦІОНАЛЬНИХ ОСОБЛИВОСТЕЙ ЗОРОВОГО АПАРАТУ ТА ОСОБЛИВОСТЯХ СПРИЙНЯТТЯ ЛЮДИНИ

У даній статті розглядається питання виявлення і відстеження малогабаритних літальних рухомих об'єктів на основі функціональних особливостей зорового апарату і особливостей сприйняття людини візуальної інформації. Автор розглядає, порівнює різні методи виявлення малорозмірних об'єктів, зокрема малогабаритних безпілотних літальних апаратів (МБПЛА) на відеопослідовності у різних умовах. Зокрема розглянуто принципи виокремлення фігури від фону, тобто виокремлення об'єкту спостереження на сцені з поміж фонової обстановки. Автор наводить паралелі з огляду функціонування та будови людського ока, теорії розпізнавання образів людиною і елементами комп'ютерного зору, що реалізує ці принципи у сфері цифрової обробки зображень та сигналів. Наведено структурну схему будови сучасного відеодавача на прикладі складової частини сучасних систем відеоспостереження – IP камери, як джерела отримання інформації щодо візуальної обстановки. Також автор аналізує можливості використання спеціальних підходів і технологій обробки зображень для поліпшення якості візуального представлення, як етапу передобробки загального методу. Запропоновано кілька евристичних підходів при вирішенні задач попередньої обробки з використанням сегментації та кластеризації зображень. Окремим підрозділом рукопису висвітлено можливість застосування автоматизованих систем керування та описано важливість роботи оператора у системах спостереження, збору та аналізу даних, зокрема візуальної інформації. Наведено основні групи методів детекції руху на відеопослідовностях зображень, проаналізовано їх переваги та недоліки роботи у різних умовах, зазначено особливості використання та застосування. Розглянуто можливість застосування нейронних мереж на етапі постобробки у процесі виявлення МБПЛА задля попередньої класифікації виявленого об'єкту на прикладі роботи сучасного алгоритму YOLOv8. Результати роботи можуть бути використані в наукових дослідженнях, у сферах безпеки та моніторингу та інших областях, де необхідно виявляти і відслідковувати малогабаритні рухомі об'єкти.

Ключові слова: детекція руху, виявлення образів, особливості зору, відеопослідовність, обробка зображень, відслідковування, відеодавач, камера, нейронні мережі, МБПЛА.

Постановка проблеми. В зв'язку з всебічним розвитком та впровадження у різні сфери життя малих безпілотних літальних апаратів питання контролю, детекції, відслідковування та супроводження є надзвичайно важливим. Кількість таких пристроїв невпинно зростає, як і зростає їх сфера застосувань від промисловості і розважальної сфери закінчуючи сферами безпеки.

Здешевлення відеокамер, зменшення їх габаритів дозволяє будувати цілі мобільні системи відстеження та аналізу даних. В менш крупному масштабі системи оператор-дрон достатньо для того щоб проводити безліч операцій та маніпуляцій. З метою забезпечення взаємодії різних систем та забезпечення безпеки повітряного простору, як масштабах підприємств та виробництва, так і в масштабах приватної власності існує необхід-

ність у створенні систем та алгоритмів, що здатні відслідковувати МБПЛА у повітряному просторі та забезпечувати їх супроводження з можливістю подальшої класифікації таких об'єктів. Останній пункт можуть непогано забезпечити штучні нейронні мережі, які перебувають у фазі активного розвитку [1]. А також існує необхідність покращення та оптимізації вже існуючих систем і алгоритмів, які наразі потребують значних витрат різноманітних ресурсів.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Сучасні дослідження дедалі глибше занурюються у деталі функціонування людського ока, периферичного зору зокрема, хоча в цій області вже немало зроблено [2–4]. Поруч активно розвиваються дослідження у сфері сприйняття та обробки візуальної інформації людиною [5–7].

Вищезазначені дослідження також впливають і на розвиток сучасного напрямку комп'ютерного зору, цифрової обробки зображень [8, 9] та штучних нейронних мереж [10]. Важко встановити де проходить конкретна межа між сферами, що призводить до надзвичайно цікавих наукових результатів, виникають роботи, які об'єднують в собі досягнення з різних областей [11, 12] та екстраполюють нові підходи у інші сфери. На базі цих досліджень базується фундаментальна практика використання новітніх «розумних» систем відеоспостереження [13, 14], які здатні виконувати широкий спектр завдань. Зроблено у цих областях немало, новизна полягає у комбінуванні та застосуванні знань з різних областей.

Метою статті є формулювання основних принципів та синтез на їх основі оптимального алгоритму покрокової обробки відеопослідовності задля виявлення та попередньої оцінки малогабаритних літальних об'єктів.

Виклад основного матеріалу. Комп'ютерний зір вивчає питання побудови моделей, аналізу відео та зображень отриманих з відеодавача [15]. Сучасні методи розв'язання задач комп'ютерного зору включають підхід на основі нечіткої логіки; підхід на базі згорткових нейронних мереж та глибокого навчання; підхід з використанням детекторів і дескрипторів [16, 17]. Цей напрямок швидко прогресує, що пов'язано зі збільшенням обчислювальної потужності комп'ютерів, а також залученням великої кількості спеціалістів до досліджень. Комп'ютерний зір використовується в десятках галузей, наприклад, при побудові «розумних» рішень, ідентифікації об'єктів, автоматизації процесів з використанням дронів, веденню відеоспостереження та багато іншого. Комп'ютерний зір почали вивчати у рамках кібернетики з метою відтворення людського бачення та сприйняття.

Цікавою особливістю функціонування зору людини – це здатність периферійного зору досить швидко та чітко визначати наявність руху у певній зоні, а потім можливість зосередити увагу на цій ділянці з об'єктом центральним зором. Дана особливість визначена як фізіологічними особливостями будови зорового апарату, так і психофізичним сприйняттям та подальшою обробкою отриманої зорової інформації певними ділянками мозку людини [18]. Що у свою чергу було обґрунтовано еволюційним розвитком людини, в умовах агресивного навколишнього середовища та високої концентрації небезпек у повсякденному житті. Варто зазначити, що людина здатна фіксувати рух одночасно у кількох зонах. На рисунку 1 показана

будова людського ока [19], з якої частково впливають особливості сприйняття візуальної інформації людиною.

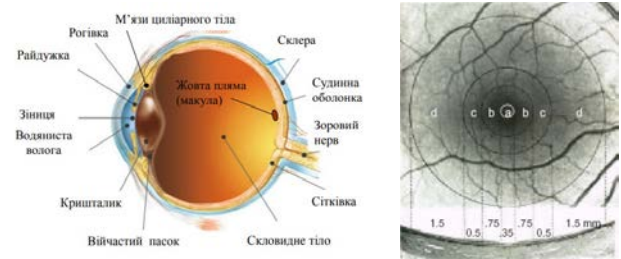


Рис. 1. Будова людського ока та анатомічний вигляд зони жовтої плями: a – foveola, b – fovea, c – parafoveal, d – perifoveal

З цікавих особливостей на рис. 1 можна побачити, що щільність та кількість паличок, по суті, елементарних фотоелементів, що фіксують яскравість у монохромному спектрі, зростають у периферійній ділянці. На ряду з особливостями сприйняття та обробки інформації мозком людини це дає змогу швидко фіксувати рух у ділянках на яких не сфокусована увага, з подальшою можливістю зміщення фокусу на цю ділянку. Детальні дослідження даного факту мають більш глибокі та обширні пояснення [2–4, 20–23].

У відповідність до структури ока та отримання зображення на сітківці а також отримання віртуального зображення внаслідок процесу зорового сприйняття сцени наведемо реалізацію даного механізму у контексті задач комп'ютерного зору [24].

Найпоширенішими та найрозповсюдженішими камерами, які використовуються у побуті, у виробництві, у сферах безпеки є IP камери. Основною відмінністю таких пристроїв від старого покоління аналогових систем відеоспостереження є формат даних на виході таких пристроїв [14]. Такі камери видають на виході цифровий потік даних, який піддається подальшій обробці програмними засобами. Принципова модульна будова такого пристрою показана на рис. 2.

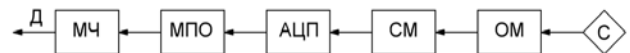


Рис. 2. Структурна схема отримання відеопотоку

На рисунку 2 основні елементи: С – сцена, OM – оптичний модуль, CM – сенсорний модуль, АЦП – аналого-цифровий перетворювач, МПО – модуль процесорної обробки, МЧ – мережева частина, Д – дані.

З огляду на основні елементи сучасної відеокамери спостереження зупинимося на основних параметрах, що відіграють найбільшу роль при

обробці відеопотоку. Узагальнена структурна схема на рис. 2 надана в спрощеному вигляді, але відображає принципові конструктивні ділянки необхідні для отримання потоку відеоданих. З огляду на це упустимо велику кількість конструктивних параметрів і зупинимось на принципово важливих параметрах в рамках даного дослідження.

До вимог відеодавачів (оптичних камер), які можуть використовуватися в системах належать такі параметри як роздільна здатність, час спрацювання затвору, кількість кадрів у секунду, кути огляду (фокусна відстань) та інші. Кожен параметр визначає для яких умов призначена конкретна камера [13].

Роль оператора людини в системах моніторингу, відеоспостереження, стеження і автоматизованих системах має величезне значення для забезпечення ефективної і надійної роботи систем. Основним завданням оператора є аналіз одержуваної інформації та прийняття обґрунтованих рішень на основі наявних даних. У разі виникнення непередбачених ситуацій або надзвичайних подій, оператор здатний оцінити контекст, зібрати інформацію і вирішити, які заходи необхідно провести. При наявності оператора можна використати так звану ePTZ (electronic pan-tilt-zoom) технологію. Звичайна PTZ камера являю собою керовану рухливу платформу, що здатна повертати камеру з моторизованим об'єктивом у вертикальній та горизонтальній площинах. Технологія ePTZ – також дозволяє здійснювати електронне панорамування, нахил та масштабування, але замість механічного руху вбудована функція PTZ імітує панорамування, нахил і масштабування, якщо роздільна здатність камери дозволяє це робити без істотної втрати якості зображення (рис. 3). Наприклад, в камерах з 4K сенсором при використанні ePTZ користувачі можуть створювати кілька унікальних сцен з роздільною здатністю 1920 на 1080 пікселів. Саме тут себе розкриває особливість людського зору гостро фіксувати рух у зоні периферії.

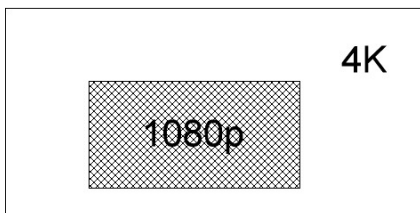


Рис. 3. Вікно функції ePTZ

Збільшення зони огляду цілком логічно підводить до якісного переходу з систем обмеженого кадру до панорамної системи, яка складається

з кількох камер, що здатні забезпечити повний огляд простору на 360 градусів (рис. 4). Такі системи на противагу основній перевазі мають деякі технічні ускладнення у побудові та обробці зображення [8, 9]. Необхідно коректно виконати «зшиття» синхронізованих зображень з різних відеодавачів, компенсувати дисторсії та вирівняти контрастність. Після такої обробки можна отримати придатне для подальшої роботи зображення.



Рис. 4. Формування панорамного зображення

Сегментація зображень також важливий інструмент на шляху до оптимальної обробки зображень. Сучасні камери мають значний вбудований функціонал передобробки зображень. ROI (region of interest) і є прикладом такого функціоналу, що здатний знімати різні частини зображення з різною роздільною здатністю, покращуючи зображення у певній області та знижуючи якість зображення у іншій. Наприклад, при зйомці ділянки вуличної дороги, нижня половина (з автомобілями і дорогою) буде записана в максимальній якості, інша частина зображення (небо, будинки) записується з низькою роздільною здатністю. Або навпаки, небо, як зона спостереження записується з високою роздільною здатністю об'єкти розташовані поблизу землі – низькою. Таким чином, обробка зображення буде здійснюватися на інформативній частині зображення, а бекграунд записується «замиленим» з огляду на низьку інформаційну ємність та для доповнення загальної картини (рис. 5).



Рис. 5. Вікно ROI

Загалом, сучасні системи відеоспостереження вже мають значний широкий функціональний діапазон закладений в програмному забезпеченні кожного пристрою, який вирішує багато типових завдань [13, 14].

Іншою цікавою особливістю сприйняття людиною зорової картини – це інтерпретація та автоматичний поділ сцени на фон та об'єкт. Це було визначено у класичній роботі [25], де надано означення фону та об'єкту (фігури). Дана особливість використана у методах відстеження руху в рамках задач комп'ютерного зору (метод моделювання фону, наприклад).

Існують основні закони сприйняття зображення для виділення окремих об'єктів на зображенні, на яких базується подальше розпізнавання образів [26]. Серед них наступні: принцип фігури-фону, принцип гарної фігури (простоти), принцип близькості, принцип спільності (подібності). Дані принципи фігурують також у інших назвах та доповненнях. Загалом вони пояснюють як людина виділяє об'єкти з поміж іншого (фону) [5, 6].

Яскравий приклад показано на рис. 6 видно однорідну структуру та її перетворення, після яких ми можемо за деякими ознаками говорити про те, що бачимо об'єкти на фоні. Це досягається або за ознакою близькості сусіда, або за кольором, або за принципом доповнення до простої фігури. Таких прикладів можна навести безліч [7]. У контексті виявлення рухомих об'єктів на відеопослідовностях при наявності груп об'єктів, шумах це вкрай важливе питання, оскільки групу пікселів можна об'єднати та ідентифікувати по-різному.

Базовим поняттям гештальт принципів є поняття простоти, яке говорить, що людина організовує сприймане так, щоб воно було регулярним, впорядкованим, симетричним і простим. Надалі цей принцип було обґрунтовано з точки зору теорії інформації [5, 6]. Мозок людини, які ідеальна теплова машина функціонує на максимальну економію нейронних ресурсів людини, і групування сприйраних об'єктів якраз зменшує ентропію (хаос, невизначеність). Отже, мозок має можливість сприймати та обробляти меншу кількість інформації в одиницю часу. Тому фактично гештальт принципи працюють на зменшення кількості інформаційних одиниць для більш ефективної обробки вхідних сигналів. Така здатність сприйняття людини опирається на набутий досвід і є еволюційно обумовленою.

Виходячи з ідеї розбиття зображення на фігуру і фон реалізовані алгоритми відслідковування на базі метод моделювання фону. Метод моделювання фону полягає в створенні статистичної моделі для фонової сцени і подальшому виділенні рухомих об'єктів шляхом визначення відхилень від цієї моделі. До цього класу відносять, наприклад, наступні методи: альфа-змішування, метод

зворотної хвилі, метод власних зображень, суміш розподілів Гауса, Байєсівське моделювання [27].

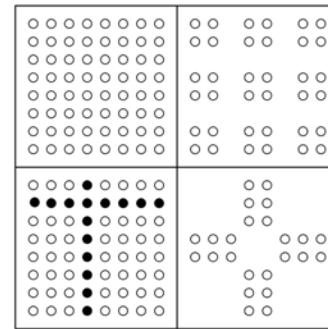


Рис. 6. Сприйняття фігури та фону

Визначення руху за рахунок обчислення диференціальної покадрової різниці – найпростіша реалізація детектору руху на відео, оскільки дозволяє просто та швидко знаходити групи пікселів, які переміщуються з часом на відео.

Формула формування різницевого зображення [27] у загальному вигляді

$$D_i(x, y) = B_i(x, y) - F_i(x, y) \quad (1)$$

де $B_i(x, y)$ – фон

$F_i(x, y)$ – передній план

Алгоритм добре працює в умовах, де фон відносно статичний, та може ефективно виявляти об'єкти, які знаходяться на тлі одного типу (наприклад, небо). Недоліком такого підходу є низька селективність по відношенню до об'єктів руху. Тобто у сценах з динамічними змінами фону, наприклад: рухомими рослинами, коливаннями освітлення і т. д. Тобто, на практиці ми побачимо різноманітні артефакти, рухи дерев, гілок та інших тіл, які не є не цікавими для нас в рамках визначення руху МБПЛА на відеопотоці. Отже основною вимогою є постійне оновлення моделі фону для адаптації до змін.

Приклад роботи такого алгоритму наведено на рисунку 7. Де чорним кольором позначено маску (фон), а білим – об'єкти, що здійснили рух.

Іншою принципово відмінною групою методів детекції руху на відеопослідовності є методи на основі обчислення оптичного потоку. Оптичний потік – це векторне поле, яке представляє напрямки і швидкості руху кожної точки зображення між двома послідовними кадрами. Характерною особливістю цих методів є те, що вони у результаті обробки надають не тільки координати об'єктів руху, а також визначають ще й швидкість переміщення пікселів. Дані методи дозволяють виявляти як глобальні, так і локальні рухи, включаючи швидкі і складні зміни сцени. Також ці методи



Рис. 7. Приклад роботи методу моделювання фону

ефективні при невеликих змінах освітлення. З іншого боку вони можуть бути менш точним у разі великих переміщень або сильних змін освітлення та вимагають наявності текстури або характерних точок на об'єктах для обчислення оптичного потоку. Відеопотік [27] подається у вигляді функції часу та координат пікселів $I(x(t), t)$

$$I(x(t), t) \frac{\partial I(x(t), t)}{\partial t} = \frac{\partial I}{\partial x} \frac{\partial x}{\partial t} + \frac{\partial I}{\partial t} = 0 \quad (2)$$

До методів обчислення оптичного потоку належать: метод Лукаса-Канаде, метод Хорна-Шанка, блокове порівняння та ін. Приклад роботи одного з методів подано на рис. 8.



Рис. 8. Приклад роботи методу визначення руху на основі обчислення оптичного потоку

Покращення та усунення недоліків методів обчислення оптичного потоку є використання дескрипторів особливих точок. Особливі точки – це такі точки які закріплюються на об'єкті для подальшого його відстежування (ознаки). Даних дескрипторів існує значна кількість, які варіюються за принципом обрання цих особливих точок. Це ознаки SIFT, GLOH, MSER та безліч інших [27; 28]. З поміж інших виділяється метод FREAK [29], оскільки він побудований на основі структури сітківки ока.

Також у рамках обробки відеопотоку варто відмітити важливість сегментації та кластериза-

ції зображень (розбиття та об'єднання). Загалом, сегментація зображень дозволяє пришвидшити обробку інформації за рахунок використання алгоритмів паралельного обчислення, тобто віддаючи певні області на обробку певним процесорним потокам. Це дозволяє підвищити швидкість обробки відеопотоку. Також сегментація, яка «по суті» використовується у методі блокового порівняння при обчисленні оптичного потоку, може бути покращена, наприклад, за рахунок введення вагових імовірнісних коефіцієнтів. Дані вагові коефіцієнти обираються емпіричним шляхом виходячи з особливостей конкретної сцени. Наприклад, у випадку МБЛА це може бути очікуваний напрямок підльоту, або зони прольоту. На рисунку схематично показано, що області неба мають більші вагові імовірнісні коефіцієнти, ніж стіна, або асфальтне покриття (рис. 9).

0.98	0.99	0.99	0.99	0.99	0.99	0.99	0.99
0.99	0.95	0.99	0.99	0.99	0.99	0.99	0.99
0.99	0.99	0.99	0.99	0.99	0.99	0.96	0.91
0.99	0.99	0.99	0.89	0.95	0.89	0.89	
0.69	0.69	0.69	0.69	0.69	0.69	0.69	0.69
0.69	0.69	0.69	0.69	0.69	0.69	0.69	0.69
0.69	0.69	0.69	0.69	0.69	0.69	0.69	0.69

Рис. 9. Сегментація за принципом імовірностей появи об'єкта

Іншим класом алгоритмів відслідковування об'єктів на зображенні є методи стеження за об'єктом на основі пошуку за шаблоном. Найпростіший з них – метод шаблонного зіставлення, схематично показаний на рис. 10. Він використовує грубо-точкову стратегію і набір домінуючих ознак для знаходження кандидатів у всьому зображенні. Потім у кожного кандидата ініціалізується локальний процес зсуву середнього значення, і ці

процеси знаходять найближчий локальний максимум у своїх відповідних сусідів.

Ще один метод, який можна використовувати для відстеження об'єкта це кореляційно-екстремальна функція [30]. Кореляційно-екстремальна функція – це метод відстеження об'єктів на відео, який використовує кореляційні фільтри для визначення положення і руху об'єктів в кадрі. Він базується на глобальних характеристиках руху цілі у відео та застосовує фільтр Калмана для коригування траєкторії відстеження рухомої цілі. Цей метод дозволяє підвищити точність і надійність відстеження об'єктів на відео.

В методах такого типу важливим нюансом є наявність якісної шаблонної вибірки. Еталон пошуку піддають процедурам ротації та масштабування, для знаходження більш якісних співпадінь на зображенні. Недоліком таких методів є їхня ненадійність в умовах зашумленості зображення та в умовах складного фону.



Рис. 10. Демонстрація принципу метода шаблонного зіставлення

Використання нейронних мереж для виконання задач. Основним недоліком задіяння штучних нейронних мереж є значна кількість обчислювальних ресурсів необхідних для обробки зображень. Частково ця проблема вирішена шляхом залучення хмарних обчислень до обробки інформації. Залишається також питання швидкості взаємодії, оскільки клієнт-серверні системи мають певну затримку.

Для покращення обробки інформації варто залучати аналіз та обробку інформації нейронною мережею на кінцевому етапі, маючи вже необхідні уточнені вхідні дані, що дасть змогу оптимізувати процес та підвищити швидкодію.

Одним із таких прикладів алгоритмів на основі нейронних мереж є алгоритм YOLO (You Only Look Once). Це алгоритм класифікації та виявлення об'єктів на відео. Він використовує згорткову нейронну мережу для виявлення та класифікації об'єктів у режимі реального часу [10]. YOLO

активно розвивається та поєднує у собі попередньо зазначені у статті алгоритми та методи у різних комбінаціях. Наразі, вже існує та функціонує YOLOv8. На рисунку 11 наведений результат роботи YOLOv8 у контексті вирішення задач відслідковування об'єктів у повітряному просторі.



Рис. 11. Приклад роботи YOLOv8

Пов'язуючи дані від нейронної мережі, яка відіграє роль класифікатора, простих алгоритмів виявлення та відслідковування на виході ми отримаємо вектор що містить наступні параметри: швидкість, поточні координати в кадрі, клас цілі, імовірність приналежності до класу.

$$C_i = [x_i, y_i, T_i^N, P_i^T] \quad (3)$$

де x_i, y_i – координати об'єкта в декартовій системі координат в дискретний момент часу

T_i^N – тип об'єкту з заданого пулу в дискретний момент часу

P_i^T – імовірність приналежності об'єкту до певного типу з заданого пулу.

Висновки. Запропоновано оптимальний алгоритм виявлення об'єкта, його оцінки та попереднього відслідковування (рис. 12). Дана реалізація дозволяє попередньо знизити навантаження на обчислювальну систему, а отже економить обчислювальний ресурс для вирішення задачі пошуку та відслідковування малогабаритного літального апарата у відеопотоці. Отриманий вектор стану надає можливість використовувати отриману інформацію у подальшій обробці та вирішенні більш складних задач, наприклад, як уточнююча інформація у системі комплексної обробки даних з дачив різної фізичної природи. Що, у свою чергу відіграє значну роль у масштабуванні системи для виявлення та відслідковування вже кількох об'єктів на відеопослідовності в складних умовах.

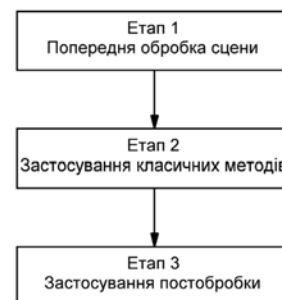


Рис. 12. Блок схема алгоритму виявлення МБПЛА

У запропонованому алгоритмі на першому етапі застосовується попередня обробка сцени виходячи з характерних особливостей самої сцени. На цьому етапі може бути застосований ROI, сегментація з на основі вагових імовірнісних коефіцієнтів та інші методи визначення зон підвищеного інтересу на базі евристичних алгоритмів та функціонування зору людини. Після того, переходимо до наступного етапу – застосування класичних методів. Це групи методів моделювання

фону, обчислення оптичного потоку, методів стеження за об'єктом на основі пошуку за шаблоном та подібні. Останнім етапом постобробки є використання методів, що задіюють нейронні мережі для класифікації попередньо отриманих даних. Така конфігурація дозволяє організувати обробку первинної інформації (відеопотоку) та пришвидшити обробку даних, оскільки кожен попередній етап оптимально обробляє та підготовлює дані для наступного.

Список літератури:

1. Тимошук П. В. Штучні нейронні мережі : навч. посіб. Львів : Вид-во Львів. політехніки, 2011. 444 с.
2. Functional connectivity in the retina at the resolution of photoreceptors / G. D. Field et al. *Nature*. 2010. Vol. 467, no. 7316. P. 673–677. URL: <https://doi.org/10.1038/nature09424> (date of access: 20.09.2023).
3. Poggel D. A., Strasburger H., MacKeben M. Cueing Attention by Relative Motion in the Periphery of the Visual Field. *Perception*. 2007. Vol. 36, no. 7. P. 955–970. URL: <https://doi.org/10.1068/p5752> (date of access: 20.09.2023).
4. Strasburger H., Rentschler I., Juttner M. Peripheral vision and pattern recognition: A review. *Journal of Vision*. 2011. Vol. 11, no. 5. P. 13. URL: <https://doi.org/10.1167/11.5.13> (date of access: 20.09.2023).
5. A century of Gestalt psychology in visual perception: I. Perceptual grouping and figure–ground organization. / J. Wagemans et al. *Psychological Bulletin*. 2012. Vol. 138, no. 6. P. 1172–1217. URL: <https://doi.org/10.1037/a0029333> (date of access: 20.09.2023).
6. A century of Gestalt psychology in visual perception: II. Conceptual and theoretical foundations. / J. Wagemans et al. *Psychological Bulletin*. 2012. Vol. 138, no. 6. P. 1218–1252. URL: <https://doi.org/10.1037/a0029334> (date of access: 20.09.2023).
7. Gregory R. L. *Eye and Brain: The Psychology of Seeing - Fifth Edition*. Princeton University Press, 2015. 296 p.
8. Gonzalez R. C. *Digital image processing*. 3rd ed. Upper Saddle River, N.J : Prentice Hall, 2008. 954 p.
9. Burger W., Burge M. J. *Digital Image Processing*. Cham : Springer International Publishing, 2022. URL: <https://doi.org/10.1007/978-3-031-05744-1> (date of access: 20.09.2023).
10. Real-Time Onboard Object Detection for Augmented Reality: Enhancing Head-Mounted Display with YOLOv8 / M. Łysakowski et al. 2023 IEEE International Conference on Edge Computing and Communications (EDGE), Chicago, IL, USA, 2–8 July 2023. 2023. URL: <https://doi.org/10.1109/edge60047.2023.00059> (date of access: 01.10.2023).
11. Cao F. Application of the Gestalt principles to the detection of good continuations and corners in image level lines. *Computing and Visualization in Science*. 2004. Vol. 7, no. 1. P. 3–13. URL: <https://doi.org/10.1007/s00791-004-0123-6> (date of access: 20.09.2023).
12. Kootstra G., Kragic D. Fast and bottom-up object detection, segmentation, and evaluation using Gestalt principles. 2011 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA), Shanghai, China, 9–13 May 2011. 2011. URL: <https://doi.org/10.1109/icra.2011.5980410> (date of access: 20.09.2023).
13. Kolekar M. H. *Intelligent Video Surveillance Systems: An Algorithmic Approach*. Taylor & Francis Group, 2018. 180 p.
14. Nilsson F., Axis C. *Intelligent Network Video: Understanding Modern Video Surveillance Systems, Second Edition*. Taylor & Francis Group, 2016. 366 p.
15. Вовк С. М., Гнатушенко В. В., Бондаренко М. В. Методи обробки зображень та комп'ютерний зір : навч. посіб. Дніпро : “ЛІРА”, 2016. 148 с.
16. Сучасні підходи до розв'язання задач комп'ютерного зору / Р. М. Тимчишин та ін. *Control Systems and Computers*. 2018. № 6 (278). С. 46–73. URL: <https://doi.org/10.15407/usim.2018.06.046> (дата звернення: 20.09.2023).
17. Пуятін Є. П., Гороховатський В. О., Матат О. О. Методи та алгоритми комп'ютерного зору : навч. посіб. Харків : СМІТ, 2006. 236 с.
18. Іонов І. А., Комісова Т. Є. *Фізіологія сенсорних систем: метод. рек. 2-ге вид.* Харків : ФОП Петров В.В., 2018. 45 с.
19. Сокурєнко В. М., Тимчик Г. С., Чиж І. Г. *Око людини та офтальмологічні прилади [Текст] : навч. посіб.* Київ : НТУУ «КПІ», 2003. 264 с.

20. Mckee S. P., Nakayama K. The detection of motion in the peripheral visual field. *Vision Research*. 1984. Vol. 24, no. 1. P. 25–32. URL: [https://doi.org/10.1016/0042-6989\(84\)90140-8](https://doi.org/10.1016/0042-6989(84)90140-8) (date of access: 20.09.2023).
21. Basler A. Über das Sehen von Bewegungen. *Pflüger, Archiv für die Gesamte Physiologie des Menschen und der Thiere*. 1906. Vol. 115, no. 11-12. P. 582–601. URL: <https://doi.org/10.1007/bf01677292> (date of access: 20.09.2023).
22. Basler A. Über das Sehen von Bewegungen. *Pflüger, Archiv für die Gesamte Physiologie des Menschen und der Thiere*. 1908. Vol. 124, no. 6-8. P. 313–335. URL: <https://doi.org/10.1007/bf01677334> (date of access: 20.09.2023).
23. Solomon J. A., Sperling G. 1st- and 2nd-order motion and texture resolution in central and peripheral vision. *Vision Research*. 1995. Vol. 35, no. 1. P. 59–64. URL: [https://doi.org/10.1016/0042-6989\(94\)e0077-x](https://doi.org/10.1016/0042-6989(94)e0077-x) (date of access: 20.09.2023).
24. Forsyth D. *Computer vision: A modern approach*. Upper Saddle River, N.J : Prentice Hall, 2003. 693 p.
25. Rubin E. *Synsoplevede figurer*. Koebenhavn : Gyldendal, 1915. 228 p.
26. Довбиш А. С., Шелехов І. В. *Основи теорії розпізнавання образів : навч. посіб. у 2-х ч.* Суми : СумДУ, 2015. 109 с.
27. Варфоломєєв А. Ю. *Методи та алгоритми автоматичного відслідковування об'єктів на відеопослідовностях: монографія / ред. О. І. Антонюк.* Київ : КІМ, 2013. 112 с.
28. Leutenegger S., Chli M., Siegwart R. Y. BRISK: Binary Robust invariant scalable keypoints. 2011 IEEE International Conference on Computer Vision (ICCV), Barcelona, Spain, 6–13 November 2011. 2011. URL: <https://doi.org/10.1109/iccv.2011.6126542> (date of access: 20.09.2023).
29. Alahi A., Ortiz R., Vandergheynst P. FREAK: Fast Retina Keypoint. 2012 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR), Providence, RI, 16–21 June 2012. 2012. URL: <https://doi.org/10.1109/cvpr.2012.6247715> (date of access: 20.09.2023).
30. Overview and methods of correlation filter algorithms in object tracking / S. Liu et al. *Complex & Intelligent Systems*. 2020. URL: <https://doi.org/10.1007/s40747-020-00161-4> (date of access: 20.09.2023).

Sokolov K.A. VISUAL DETECTION AND TRACKING OF SMALL MOVING OBJECTS BASED ON THE FUNCTIONAL FEATURES OF THE VISUAL APPARATUS AND THE PECULIARITIES OF HUMAN PERCEPTION

This article discusses the detection and tracking of small flying moving objects based on the functional features of the visual apparatus and the peculiarities of human perception of visual information. The author considers and compares various methods of detecting small objects, including small unmanned aerial vehicles (UAVs) in video sequences under different conditions. In particular, the principles of figure separation from the background, i.e., the separation of the observed object on the scene from the background environment, are considered. The author draws parallels with the review of the functioning and structure of the human eye, the theory of human image recognition, and elements of computer vision that implement these principles in the field of digital image and signal processing. A structural diagram of a modern video transmitter is presented using the example of a component part of modern video surveillance systems - an IP camera, as a source of information about the visual environment. The author also analyzes the possibilities of using special approaches and image processing technology to improve the quality of visual representation as a preprocessing stage of the general method. Several heuristic approaches are proposed for solving preprocessing tasks using segmentation and image clustering. A separate section of the manuscript highlights the possibility of using automated control systems and describes the importance of operator work in surveillance systems, data collection and analysis, including visual information. The main groups of motion detection methods in video sequences are presented, their advantages and disadvantages in different conditions are analyzed, features of use and application are noted. The possibility of using neural networks at the post-processing stage in the process of detecting UAVs for preliminary classification of the detected object is considered using the example of the modern YOLOv8 algorithm. The results can be used in scientific research, in security and monitoring spheres, and other areas where it is necessary to detect and track small moving objects.

Key words: motion detection, image recognition, features of vision, video sequence, image processing, tracking, video sensor, camera, neural networks, SDUAV.

УДК 004.05

DOI <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2023.5/14>**Хаченко О.В.**Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»**Лисенко О.М.**Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

ПОРІВНЯЛЬНИЙ АНАЛІЗ СУЧАСНИХ ТИФЛОТЕХНІЧНИХ РІШЕНЬ НА БАЗІ СМАРТФОНУ

У останні роки спостерігається значний прогрес у розробці та впровадженні тифлотехнічних рішень, спрямованих на полегшення повсякденного життя сліпих та слабозорих осіб.

Проаналізовано останні дослідження та додатки щодо функціональних можливостей сучасних тифлотехнічних рішень на базі смартфона для сліпих та слабозорих, реалізованих на основі Wi-Fi/Bluetooth маяків, тег-міток у вигляді спеціальних кольорових картинок, технологій штучного інтелекту і комп'ютерного зору з використанням вібраційних та звукових способів взаємодії користувача з вадами зору з тифлотехнічною системою, GPS з голосовою навігацією та зворотнім зв'язком. Ці технології дозволяють створювати рішення для поліпшення якісного рівня життя цільової аудиторії прямо у смартфоні, який є у кожної людини. Важливим аспектом деяких додатків є також наявність функції залучення волонтерів, які можуть надавати допомогу через камеру смартфона та Інтернет, що допомагає користувачам розв'язувати різноманітні завдання, а саме навігація, стиль одягу, загублена річ, опис фотографії, картин або інших витворів мистецтва, вирішення проблем з комп'ютером, здійснення покупок, визначення терміну придатності продуктів, прибуття та відправлення громадського транспорту тощо.

Наведено порівняльний аналіз існуючих додатків за їх популярністю на основі оцінок користувачів та кількості завантажень, за їх функціональністю, а саме допомога в повсякденному житті чи в навігації, та вказали платформи які підтримують. Встановлено, що функція навігації користується найбільшим попитом, а найпопулярніші додатки залучають волонтерів, які за допомогою камери смартфона мають змогу допомогти користувачам з вадами зору з вирішенням різних питань.

Обґрунтовано важливість та запропоновано класифікацію сучасних тифлотехнічних рішень на базі смартфона, що дозволить розробникам отримати структуровану інформацію щодо функціональних можливостей та областей застосування існуючих рішень, сприяючи кращому розумінню потреб користувачів. В свою чергу, це дасть змогу розробникам та дослідникам знаходити вектор розвитку та створення власного тифлотехнічного рішення.

Ключові слова: тифлотехніка, навігація для сліпих та слабозорих, смартфон, порівняльний аналіз, класифікація.

Постановка проблеми. Загальновідомо, що людина отримує більшу частину інформації за допомогою зору. За даними ВООЗ на планеті налічується близько 285 мільйонів сліпих людей, серед них 39 мільйонів не бачать взагалі нічого, а 18% перебувають у віковій категорії до 50 років [1]. Цей стан сильно впливає на їхнє повсякденне самопочуття, поведінку і суттєво впливає на їхню здатність адаптуватися до навколишнього середовища та взаємодіяти з ним.

Актуальність проблем, з якими стикаються незрячі та слабозорі люди, спонукає багатьох науковців досліджувати нові підходи до їх вирішення. Одним із ключових напрямів є створення тифлотехнічних рішень, які здатні компенсувати

відсутні сенсорні дані та полегшити адаптацію інвалідів по зору до навколишнього середовища, забезпечуючи можливості самостійного життя в суспільстві.

Попри розмаїття тифлотехнічних рішень, залишаються відкритими питання їх ефективності та доступності для цільової аудиторії. Особливу увагу слід приділити технічним рішенням на базі смартфона, які суттєво впливають при створенні нових тифлотехнічних застосунків та додатків. На відміну від поширеної думки смартфони стали невід'ємною частиною життя для незрячих. Смартфони мають весь необхідний інструментарій для створення ефективних та економічно вигідних для кінцевого користувача тифлотех-

нічних рішень. Зокрема, завдяки наявності таких безпроводних технологій як Bluetooth, Wi-Fi та компонентів як гіроскоп, акселерометр, вібратор, динамік, мікрофон та камера смартфони надають широкі можливості для розробки інноваційних асистивних застосунків. Саме це стало причиною наявного безпрецедентного зростання на ринку числа різноманітних нових тифлотехнічних рішень на базі смартфона, що обумовлює актуальність та диктує необхідність вирішення завдання їх подальшого порівняльного аналізу, упорядкування та систематизації.

Метою статті є проведення порівняльного аналізу існуючих тифлотехнічних застосунків на базі смартфона, виявлення переваг та недоліків кожного підходу з урахуванням функціональності, доступності, ефективності та досвіду використання тифлотехнічних рішень особами з обмеженими можливостями зору та їх класифікація. Це дозволить обґрунтовано обрати кінцеву реалізацію для розроблення власного тифлотехнічного застосунку, а також стек технологій обраного програмного забезпечення та необхідні функції.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Наразі існує величезна кількість тифлотехнічних рішень, призначених для підтримки та поліпшення життя людей із порушеннями зору.

Для початку почнемо з навігаційних додатків та сервісів, які дозволяють користувачам планувати та будувати маршрути, знаходити точки інтересу та зупинки громадського транспорту. Вони використовують геолокацію, GPS та аудіо підказки, які дозволяють створювати розширені маршрути та вказівки, адаптовані до потреб незрячих користувачів. Наприклад, додатки BlindSquare [2], Moovit [3], Lazarillo [4], Eye-D [5] та Google Maps [6] використовують поєднання геолокації та бази даних, щоб надавати інформацію про магазини, кафе, перехрестя та інші об'єкти навколишнього середовища. Wayfindr [7] і NavCog [8] спеціалізовані на навігації в приміщеннях із використанням Bluetooth маячків для надання вказівок у станціях метро, аеропортах та інших закритих просторах. Також цікавим рішенням є система NaviLens [9], яка надає навігацію з використанням QR-кодів та аудіоінструкцій. Іншим прикладом є BlindWays [10], які змогли частково вирішити проблему з навігацією людей з порушенням зору до автобусних зупинок у Бостоні, оскільки при GPS навігації похибка може складати до 10 метрів, що змушує незрячих людей пропускати автобус. Тому це було виправлено за допомогою краудсорсингових під-

казок, які описують впізнавані та постійні орієнтири біля автобусної зупинки, такі як дерево, пожежний гідрант, поштова скринька тощо. Краудсорсингові підказки дозволяють користувачам сформувати ментальну мапу, яка веде їх у межах (120–150) см від їхньої автобусної зупинки, щоб вони могли доторкнутися до вказівника і переконаватися, що вони знаходяться в потрібному місці. Ще відомими є Aira Explorer [11] та Be My Eyes [12], які забезпечують можливість взаємодії з операторами для отримання в реальному часі описів і допомоги. Цікавим також є Microsoft Soundscape [13], який є додатком для навігації з використанням 3Д звукових підказок, тобто, якщо будівля, про яку інформує додаток, знаходиться по лівій бік від користувача, то звук лунатиме саме з того боку. Використовуючи навушники з функцією Head Tracking Headset додатково буде відслідковуватися поворот голови відносно об'єкту інформування. Також з 3Д позиціонуванням ефективніше можна зрозуміти такі функціонали додатку як «Моє місце розташування», «Навколо мене» і «Попереду мене». Додаток Nearby Explorer [14] надає аудіальні підказки для навігації, користуючись інформацією з OpenStreetMap [15], яку доповнює онлайн-даними з Google Places [16].

Додатки для розпізнавання об'єктів та тексту допомагають отримувати візуальні інформацію для незрячих та слабозорих користувачів. Ці додатки використовують камеру смартфона для зйомки та обробки зображень за допомогою комп'ютерного зору зі штучним інтелектом, таким чином вони надають аудіальні підказки, дозволяючи розпізнавати обличчя, текст, об'єкти та кольори. Наприклад, програма Envision AI [17] або Seeing AI [18] від Microsoft, яка забезпечує розпізнавання облич, тексту, грошей та оцінку настрою людей на фотографіях. TapTapSee [19] дозволяє зробити знімок об'єкту, після чого додаток після аналізу штучним інтелектом надає аудіальний опис того, що зображено на фотографії. Інше рішення Supersense [20], яке дозволяє розпізнавати об'єкти, документи та текст за рахунок штучного інтелекту та робити звукові підказки про навколишнє середовище. Цікавим є Lookout [21] від Google, який використовує комп'ютерний зір для розпізнавання та відтворення тексту, також має режим «розпізнавання харчових етикеток», щоб швидко ідентифікувати упаковані продукти за їхньою етикеткою на додаток до сканування штрих-кодів, чи режим «валюта» для швидкої та надійної ідентифікації банкнот з підтримкою доларів США, євро та індійських рупій. LookTel Money Reader [22] вміє розпізнавати

грошові купюри з підтримкою 21 валют. Більш цікавим є Cash Reader [23], який розпізнає валюти 167 країн, а також має ряд унікальних функцій, а саме: розраховувати грошову суму вслух або у випадку, якщо місце шумне або необхідна конфеденційність, то повідомляє суму завдяки вібрації; працює без підключення інтернету; швидко ідентифікує та сортує валютні банкноти.

Велика популярність і широкого використання отримали додатки та сервіси з відеозв'язком, які відкрили нові можливості для спілкування та допомоги незрячим або слабозорим людям. Ці рішення дозволяють отримувати допомогу та консультації від добровольців та спеціалістів у різних сферах, наприклад, термін придатності того чи іншого продукту, чи пасує їм ця одежа, допомога у виставленні певної температури на пральній машині з сенсорними кнопками, у приготування їжі та інше. Найпоширенішим прикладом є додаток Be My Eyes [12], який дозволяє зв'язатися з добровольцями через відозв'язок і отримати допомогу у вирішенні різних питань. Звісно, цей додаток також має функціонал приєднання до добровольців і допомагати слабозорим або незрячим користувачам. Інший сервіс Aira Explorer [11], який надає доступ до агентів, які сприяють навігації, читанню та також вирішенню різних ситуацій.

Ще не менш важливими є спільнотні додатки, які виступають як платформа для спілкування, обміну досвідом та підтримки між незрячими і слабозорими користувачами. BeSpecular [24] дозволяє користувачам надавати та отримувати допомогу через аудіальні повідомлення, сприяючи обміну знань та підтримці. Додаток BlindSquare Event [25] надає інформацію та підтримку під час масових заходів.

Додатки, які використовують технології розпізнавання QR-кодів та спеціальних розроблених тегів та кодів, додають нові можливості для навігації та доступу до інформації. NaviLens[9], які розробили власні тег мітки, схожі на кольорові QR-коди, у вигляді квадрату зі стороною близько 13 см і найважливіше, що зі смартфона його можна прочитати на відстані до 12 м за 30 мс. Зчитування можливе також і під час руху і навіть без фокусування.

Також є інші специфічні додатки, зокрема, такий як Talking Turner [26], який є навчальним додатком для набору тексту і надає аудіальні підказки. Інший застосунок Color ID [27], який допомагає визначити колір об'єкта з використанням камери смартфона та вимовляти назви кольорів і навіть відтінків у режимі реального часу. Ще

варто вказати про додаток OneStep Reader [28], який дає змогу сліпим та слабозорим людям швидко отримувати доступ до змісту друкованих матеріалів у будь-якому місці та в будь-який час, використовуючи фотографію будь-якого тексту, який миттєво читається вголос.

Варто згадати й про вбудовані функціональні додатки TalkBack [29] для Android від Google та VoiceOver [30] для iOS від Apple, які розроблені для користувачів з порушеннями зору. Вони надають аудіальні повідомлення та описи елементів на екрані, що дозволяє незрячим та слабозорим людям взаємодіяти з пристроєм. Також обидва читають вголос текст, ідентифікують та озвучують елементи інтерфейсу, включаючи значки, кнопки, сповіщення та інше. Користувачі можуть використовувати жести та навігаційні команди для переміщення між елементами та взаємодії з ними. Розробники можуть використовувати цей вбудований функціонал для створення власного тифлотехнічного додатку.

Виклад основного матеріалу. Розглянуті вище тифлотехнічні рішення зведено нижче в табл. 1, де наведено показники їх популярності на основі оцінок користувачів та кількості завантажень, а також за наявності в них функціоналів навігації та повсякденної підтримки.

Проаналізувавши табл. 1 шляхом порівняння різних додатків для слабозорих та незрячих користувачів, слід виділити наступні аспекти, які впливають на їх популярність та значимість для цільової аудиторії.

Насамперед, можна побачити, що найбільшою популярністю у інвалідів по зору користуються додатки (NaviLens, Be My Eyes, Moovit та ін.), які забезпечують навігацію та визначення маршрутів.

Додатки, що використовують комп'ютерний зір та штучний інтелект для розпізнавання об'єктів, тексту, облич, кольорів (Seeing AI, TapTapSee, Eye-D) та завантажуються користуються доволі низькою популярністю, що демонструє недовіру або недопрацьованість на сьогодні цих підходів надання допомоги.

Однак, найважливіше, що впливає з проведеного аналізу, це те, чому довіряють в найбільшій мірі незрячі користувачі, а саме – це додаткам, які зв'язують такого користувача з людиною-волонтером, яка точно допоможе у будь-якій ситуації, будь-то питання навігації, вимкнення сенсорної пральної машини чи будь-що інше.

В той же час така велика різноманітність існуючих тифлотехнічних рішень на базі смартфона спонукає зробити класифікацію цих рішень, яка

дасть змогу систематизувати їхні особливості та напрямки застосування, що може допомогти в подальшому дослідникам та розробникам з вибором «власної дорожньої карти», а також користувачам із порушеннями зору вибрати найбільш

підходяще рішення залежно від їхніх потреб та сценаріїв використання.

В першу чергу необхідно визначити основне призначення додатку, а саме навігація, розпізнавання об'єктів, тексту та купюр, а також інший

Таблиця 1

Характеристики тифлотехнічних додатків та сервісів

Рішення	Платформа	Оцінка AppStore оцінка (кількість оцінок)	Кількість завантажень Play Market	Оцінка PlayMarket оцінка (кількість оцінок)	Навігація	Підтримка у повсякденних задачах
NaviLens	ios/android	5 (10)	від 10 тис.	-	-	-
Wayfindr	-	-	-	-	✓	-
BlindSquare	ios	3,5 (2)	-	-	✓	-
BlindSquare Event	ios	4,2 (5)	-	-	✓	-
Be My Eyes	ios/android	4,9 (375)	від 1 млн.	4,5 (28,5 тис.)	✓	✓
TapTapSee	ios/android	4,2 (1,7 тис.)	від 500 тис.	3,8 (1,64 тис.)	-	✓
Aira Legacy / Aira Explorer	ios/android	4,7 (2 тис.)	від 1 тис.	-	✓	✓
Seeing AI	ios	4,4 (517)	-	-	-	✓
Lazarillo	ios/android	4,3 (6)	від 100 тис.	4,1 (1,5 тис.)	✓	-
BlindWays	ios	відсутні оцінки	-	-	-	✓
Moovit	ios/android	4,4 (4,8 тис.)	від 100 млн.	4,4 (1,33 млн.)	✓	-
BeSpecular	android	-	від 10 тис.	3,3 (136)	✓	✓
Envision AI	ios/android	4,2 (406)	від 100 тис.	4,0 (5,29 тис.)	-	✓
Supersense	ios/android	4,3 (220)	від 50 тис.	-	-	✓
Lookout	android	-	від 100 тис.	3,5 (2,83 тис.)	-	✓
NavCog	ios	відсутні оцінки	-	-	✓	-
Microsoft Soundscape	ios	відсутні оцінки	-	-	✓	-
Nearby Explorer	ios	завантажується лише з сайту розробників			✓	-
Google Maps	ios/android	4,7 (5,8 млн)	від 10 млрд	3,9 (17,3 млн)	✓	-
Eye-D	android	-	від 5 тис.	4,3 (815)	-	✓
Talking Typer	ios/android	3,9 (8)	від 50 тис.	3,4 (229)	-	✓
Cash Reader	ios/android	4,4 (464)	від 500 тис.	3,6 (1,93 тис.)	-	✓
Color ID	android	завантажується лише з сайту розробників			-	✓
OneStep Reader	ios/android	-	від 50 тис.	2,9 (815)	-	✓
LookTel Money Reader	ios	завантажуються лише з сайту розробників			-	✓

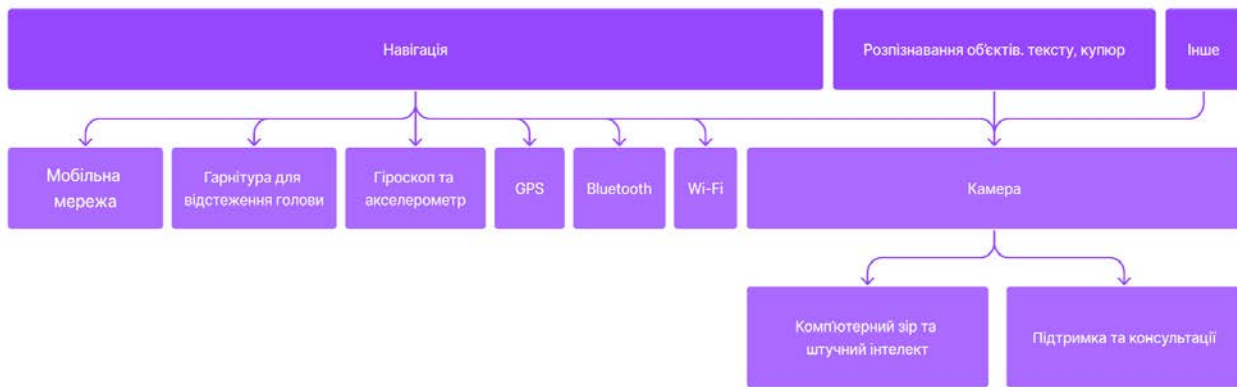


Рис. 1. Класифікація тифлотехнічних рішень на базі смартфону

функціонал, куди відносяться розпізнавання кольорів, допомога волонтерів та інші цікаві рішення. Навігацію Moovit, Google Maps, Lazarillo, Microsoft Soundscape та багато інших забезпечують за допомогою GPS, мобільної мережі або Wi-Fi, також використовуючи для більш детального розуміння пересування гіроскоп та акселерометр. Є рішення, які для навігації використовують лише Bluetooth, так як це робить WayFindr. Також варто не забувати про камеру смартфона та комп'ютерний зір і чудове рішення з кастомними кольоровими тегами від NaviLens. Розпізнавання об'єктів, тексту та купюр чудово відображають додатки TapTapSee, Eye-D, Seeing AI тощо. Щодо всіх інших задач найкраще впораються волонтери в додатках Be My Eyes, Aira Explorer тощо.

Вищезазначена класифікація існуючих тифлотехнічних застосунків на основі смартфона наведено нижче на рис. 1.

Висновки. Встановлено наявність на ринку значного числа тифлотехнічних рішень на основі смартфона, що полегшують повсякденне життя користувачів з вадами зору. Ці застосунки допомагають у навігації, розпізнаванні об'єктів та тексту, а також у спілкуванні з іншими користувачами.

В результаті порівняльного аналізу з'ясовано, що додатки, які сприяють взаємодії з волонтерами або операторами, мають найвищий рівень довіри та найбільш популярні у користуванні. Безпосередня підтримка та консультації у реальному

часі, які забезпечують додатки **Be My Eyes**, **Aira Explorer** та інші, роблять їх невід'ємною частиною повсякденного життя незрячих користувачів.

Наведено порівняльний аналіз існуючих додатків за їх популярністю на основі оцінок користувачів та кількості завантажень. Встановлено, що функція навігації користується найбільшим попитом, а найпопулярніші додатки залучають волонтерів, які за допомогою камери смартфона мають змогу допомогти користувачам з вадами зору з вирішенням різних питань.

Обґрунтовано важливість упорядкування та систематизації сучасних тифлотехнічних застосунків на базі смартфона та запропоновано їх класифікацію, що дозволить розробникам отримати структуровану інформацію щодо функціональних можливостей та областей застосування існуючих рішень, сприяючи кращому розумінню потреб користувачів. В свою чергу, це дасть змогу розробникам та дослідникам знаходити вектор розвитку і створення власного тифлотехнічного рішення, а користувачам із порушеннями зору допомогти зробити власний вибір на основі їхніх індивідуальних потреб і сценаріїв використання.

Напрямок подальших досліджень є обґрунтування вибору структурно-функціональної організації створюваного тифлотехнічного навігаційного застосунку на основі смартфона та розроблення алгоритмічних і програмних рішень його реалізації.

Список літератури:

1. Vision Loss Expert Group of the Global Burden of Disease Study. Causes of blindness and vision impairment in 2020 and trends over 30 years: evaluating the prevalence of avoidable blindness in relation to «VISION 2020: the Right to Sight». *Lancet Global Health* 2020. DOI:10.1016/S2214-109X(20)30489-7.
2. BlindSquare. URL: <https://www.blindsquare.com/>. Accessed on: August 18, 2023.
3. Moovit. URL: <https://moovit.com/features/accessibility/>. Accessed on: August 18, 2023.
4. Lazarillo. URL: <https://lazarillo.app/>. Accessed on: August 18, 2023.
5. Eye-D. URL: <https://eye-d.in/>. Accessed on: August 18, 2023.

6. Google Maps. URL: <https://blog.google/products/maps/better-maps-for-people-with-vision-impairments/>. Accessed on: August 18, 2023.
7. Open Standard for Audio-based Wayfinding. URL: <http://www.wayfindr.net/wp-content/uploads/2018/07/Wayfindr-Open-Standard-Rec-2.0.pdf>. Accessed on: August 18, 2023.
8. NavCog. URL: <https://techacute.com/navcog-indoor-mobile-navigation-for-the-visually-impaired/>. Accessed on: August 18, 2023.
9. NaviLens. URL: <https://www.navilens.com/>. Accessed on: August 18, 2023.
10. BlindWays. URL: <https://www.perkins.org/resource/blindways-crowdsourced-bus-stop-location-app/>. Accessed on: August 18, 2023.
11. Aira Explorer. URL: <https://aira.io/>. Accessed on: August 18, 2023.
12. Be My Eyes. URL: <https://www.bemyeyes.com/>. Accessed on: August 18, 2023.
13. Microsoft Soundscape. URL: <https://www.microsoft.com/en-us/research/product/soundscape/>. Accessed on: August 18, 2023.
14. Nearby Explorer. URL: <https://tech.aph.org/neandroid/>. Accessed on: August 18, 2023.
15. OpenStreetMap. URL: <https://www.openstreetmap.org/>. Accessed on: August 18, 2023.
16. Google Places. URL: <https://developers.google.com/maps/documentation/places/web-service/overview>. Accessed on: August 18, 2023.
17. Envision AI. URL: <https://www.letsenvision.com/>. Accessed on: August 18, 2023.
18. Seeing AI. URL: <https://www.microsoft.com/en-us/garage/wall-of-fame/seeing-ai/>. Accessed on: August 18, 2023.
19. TapTapSee. URL: <https://taptapseeapp.com/>. Accessed on: August 18, 2023.
20. Supersense. URL: <https://www.supersense.app/>. Accessed on: August 18, 2023.
21. Lookout. URL: <https://blog.google/outreach-initiatives/accessibility/lookout-app-help-blind-and-visually-impaired-people-learn-about-their-surroundings/>. Accessed on: August 18, 2023.
22. LookTel Money Reader. URL: <http://www.looktel.com/moneyreader>. Accessed on: August 18, 2023.
23. Cash Reader. URL: <https://cashreader.app/>. Accessed on: August 18, 2023.
24. BeSpecular. URL: <https://www.bespecular.com/>. Accessed on: August 18, 2023.
25. BlindSquare Event. URL: <https://www.blindsquare.com/ufaqs/what-is-blindsquare-event/>. Accessed on: August 18, 2023.
26. Talking Typer. URL: <https://www.applevis.com/apps/ios/education/talking-type-r>. Accessed on: August 18, 2023.
27. Color ID. URL: <https://color-id-free.soft112.com/>. Accessed on: August 18, 2023.
28. OneStep Reader. URL: <https://www.facebook.com/onestepreader/>. Accessed on: August 18, 2023.
29. TalkBack. URL: <https://support.google.com/accessibility/android/answer/6283677>. Accessed on: August 18, 2023.
30. VoiceOver. URL: <https://support.apple.com/uk-ua/guide/iphone/iph3e2e415f/ios>. Accessed on: August 18, 2023.

Khapchenko O.V., Lysenko O.M. COMPARATIVE ANALYSIS OF SMARTPHONE-BASED TIFLOTECHNICAL NAVIGATION SOLUTIONS

In recent years, significant progress has been observed in the development and implementation of assistive technologies aimed at improving the daily lives of blind and visually impaired individuals.

Recent research and applications have been analyzed regarding the functional capabilities of modern smartphone-based assistive technologies for the blind and visually impaired. These technologies are based on Wi-Fi/Bluetooth beacons, tag markers in the form of special color images, artificial intelligence, computer vision, and utilize vibration and auditory feedback for user interaction with visual impairments in assistive systems. These technologies enable the creation of solutions to enhance the quality of life for the target audience directly through smartphones, which are ubiquitous among the general population. Another important aspect of some applications is the inclusion of volunteer assistance, where volunteers can provide help through the smartphone's camera and the Internet. This assists users in accomplishing various tasks, including navigation, clothing style assessment, finding lost items, describing photos, artwork, solving computer-related issues, making purchases, determining the shelf life of products, and accessing public transportation schedules, among others.

A comparative analysis has been provided for existing applications, considering their popularity based on user ratings, download counts, and their functionality, especially in daily life or navigation contexts. Additionally, the supported platforms have been indicated. It has been established that navigation functionality is in high demand, and the most popular applications involve volunteers who can assist users with visual impairments in solving various issues using their smartphone cameras.

The importance of classifying modern smartphone-based assistive technologies has been substantiated and a classification has been proposed. This classification will enable developers to access structured information regarding the functional capabilities and application areas of existing solutions, thereby contributing to a better understanding of user needs. Consequently, this will empower developers and researchers to identify the direction for the development and creation of their own assistive solutions for individuals with visual impairments.

Key words: *blind technology, navigation for the blind and visually impaired, smartphone, comparative analysis, classification.*

УДК 621.391

DOI <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2023.5/15>**Шмігель Б.О.**Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»**Григоренко О.Г.**Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

АНАЛІЗ ХАРАКТЕРИСТИК ШИРОКОСМУГОВИХ СИГНАЛІВ В УМОВАХ ОБМЕЖЕНОЇ ЕНЕРГЕТИКИ

Стаття присвячена актуальній проблемі сучасного суспільства – задоволенню потреб у забезпеченні стійкого зв'язку в умовах низької енергетики ліній зв'язку, завод та багатопроменевого розповсюдження. Безпроводові мережі займають ключову роль у разі необхідності оперативного розгортання, мобільності, гнучкості організації мережі, у багатьох випадках будучи єдиним економічно виправданим рішенням. Однією із ключових задач забезпечення функціонування безпроводової мережі є забезпечення надійного та продуктивного передавання інформації в умовах обмежених ресурсів, зокрема, енергетичних.

В літературі широкопугові сигнали (ШСС) розглядається як один з методів підвищення заводостійкості каналу, однак властивостей таких сигналів в умовах обмеженого ресурсу та енергії сигналу не досліджено. ШСС в порівнянні зі вузькосмуговими сигналами (ВСС) мають багато цінних властивостей: високу достовірність передачі інформації в каналах з багатопроменевим поширенням і в переважаних ділянках діапазону, більшою стійкістю по відношенню до прицільних перешкод, кращою скритністю. ШСС мають потенціал для підвищення заводостійкості, проте для їх ефективного використання у системах телекомунікацій потрібно зрозуміти їх поведінку та характеристики в умовах низької енергетики. Тому тема дослідження є актуальною.

У статті розглянуто характеристики сигналів багатопозиційної маніпуляції в умовах низької енергетики, та порівняно ефективність використання сигнально-кодових конструкцій та ШСС. Для визначення доцільності використання ШСС в умовах низької енергетики, побудовано модель оцінки каналів передачі інформації та порівняно характеристики заводостійкості з ВСС та еквівалентною енергією сигналу. За отриманими показниками проведено оцінку впливу використання ШСС на показники функціонування, а також розглянуто пропозиції щодо їх впровадження та подальшого використання.

Ключові слова: заводостійкість, коефіцієнт бітових помилок, широкопуговий, вузькосмуговий, енергія, розширення спектру.

Постановка проблеми. Вирішення низки проблем розвитку радіотехнічних систем різного призначення призвело до ідеї широкопугових сигналів (ШСС). У вітчизняній та зарубіжній науці достатнього досліджені окремо умови використання ШСС, але немає досліджень властивостей цих сигналів в умовах низької енергетики. До того ж, тематика досягнення необхідної достовірності в низькоенергетичних каналах не досліджено. Тому тема дослідження є актуальною.

В багатьох випадках зручно представити ШСС як сигнальну конструкцію, що складається із певної кількості n «елементів» $S_c(t)$, кожен з яких може розглядатися як простий сигнал тривалістю T з власним значенням амплітуди, фази або частоти.

Широкопуговими сигналами (ШСС) називають такі сигнали, у яких добуток ширини спектра F на тривалість елемента сигналу T багато більше одиниці, тобто база сигналу B :

$$B = FT \gg 1. \quad (1)$$

Для широкопугових сигналів характерним база сигналу значно більше одиниці (частіше значення B досягає 1000 і більше).

Якщо джерело повідомлень формує символи тривалістю τ_s , відповідно, із швидкістю $V_s = 1/\tau_s$, то при заданій потужності сигналу в точці прийому P_c енергетичний фактор h^2 для ВСС складає:

$$h^2 = \frac{E_s}{N_0} = \frac{P_c \cdot \tau_s}{N_0}. \quad (2)$$

Відповідно, такий сигнал займає смугу частот $\Delta F_c \approx V_s$.

Якщо енергію ВСС поділити між n елементами ШСС з такою ж потужністю, то тривалість елемента складатиме: $T = \tau_s / n$, а смуга частот сигналу:

$$\Delta F \approx \frac{1}{T} = n \cdot \left(\frac{1}{\tau_s} \right) \approx n \cdot \Delta F_c. \quad (3)$$

Добуток $\Delta FT = B$ має назву бази ШСС і чисельно співпадає з $n = B$. Резульгуюча енергія всіх n «елементів» $S_c(t)$ дорівнює енергії ВСС E_s .

Отже, широкосмугові сигнали можна розглядати як похідні від відповідних вузькосмугових сигналів з рівною еквівалентною енергією. Відношення сигнал-шум h^2 для вузькосмугового сигналу ділиться на B для кожного окремого символу ШСС $S_c(t)$: $h_c^2 = h^2/B$. Саме це є фактором скритності ШСС.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. З літератури [1–3] відомо, що одним із запропонованих методів підвищення завадостійкості є застосування систем з широкосмуговими сигналами. Пояснюється це тим, що широкосмуговий радіозв'язок в порівнянні зі вузькосмуговими сигналами (ВСС) має багато цінних (особливо для військової радіозв'язку) властивостей: високою достовірністю передачі інформації в каналах з багатопроменевим поширенням і в переважаних ділянках діапазону, більшою стійкістю по відношенню до приціпних перешкод і кращою скритністю.

Також відомо, що ШСС можуть забезпечити високу достовірність прийому з невеликими коливаннями ймовірності помилок, в той час як при ВСС іноді (при відсутності перешкоди на даній частоті) достовірність зв'язку буде дуже високою, а іноді дуже низькою. Це обумовлено тим, що в смузі частот вузькосмугового сигналу спектральна щільність перешкод може сильно флюктувати, а в смузі частот ШСС вона змінюється мало. З розширенням смуги відбувається усереднення діючих в цій смузі перешкод.

Інша проблема пов'язана з розвитком систем передачі інформації. Тут виник конфлікт між бажанням, з одного боку, передати з граничною швидкістю якнайбільше інформації, а з іншого боку забезпечити високу достовірність прийому. Принципове вирішення цієї суперечності належить К. Шеннону, який ввів поняття пропускної спроможності каналу C і показав:

$$C = F \cdot \log_2 \left(1 + \frac{S}{N} \right), \quad (4)$$

де F – смуга частот, що відводиться передачі інформації, $F=1/T$, S і N – потужності сигналу та шуму, відповідно. Слід зазначити, що з $S/N \ll 1$ формула (4) перетворюється на (1). Дійсно, співвідношення (4) можна переписати у такому вигляді:

$$\frac{1}{\log_2 \left(1 + \frac{S}{N} \right)} = F \cdot T. \quad (5)$$

При $\frac{S}{N} \ll 1$ ліва частина рівності прямує до нескінченності. Таким чином, застосування складних широкосмугових сигналів дозволяє забезпечити теоретично будь-яку достовірність передачі інформації.

Звідси випливає ще одна дуже важлива властивість систем з ШСС – здатність працювати «під

шумами» ($S \ll N$). З одного боку, це скритність роботи радіотехнічної системи, з іншого – можливість ущільнення діючих каналів зв'язку і передачі інформації. Отже, найбільш серйозні проблеми радіолокації, передачі інформації та зв'язку вирішуються складних широкосмугових сигналів.

Метою статті є визначення властивостей ШСС на основі моделей оцінки якості каналів зв'язку, а також порівняти характеристики завадостійкості з ВСС та еквівалентною енергією сигналу.

Виклад основного матеріалу. Розглянемо показники завадостійкості системи ШСС з активною паузою і протилежними сигналами, як одну із найбільш завадостійких [1]. Будемо вважати, що генератор шуму передавального пристрою генерує нормальний шум з рівномірним спектром в полосі частот F , а на вхід приймального пристрою, крім корисного сигналу, поступає адитивна завада в виді нормального білого шуму в смузі частот корисного сигналу.

Тоді вираз для залежності ймовірності помилки інформаційного біта p_b від відношення потужності сигнал/шум (параметра h^2) у автокореляційній системі з активною паузою і протилежними сигналами має вигляд [1]:

$$P_b(h^2) = \frac{1}{2} \left[1 - \Phi \left(\frac{h^2}{\sqrt{\frac{5h^4}{2FT} + 4h^2 + 2FT}} \right) \right]. \quad (6)$$

Для порівняння показників ШСС з показниками достовірності ВСС при побудові графіків для сигналу з фазовою маніпуляцією, скористаємося співвідношенням [6]:

$$P_{bPSK}(h^2) = \frac{1}{2} [1 - \Phi(\sqrt{2h^2})] \quad (7)$$

Відповідно до формул, побудуємо графіки залежності ймовірності бітової помилки p_b від енергетичного потенціалу в радіолінії h^2 .

Проведемо аналіз поведінки виразу (6):

$$P_b(h^2) = \frac{1}{2} \left[1 - \Phi \left(\frac{h^2}{\sqrt{\frac{5h^4}{2FT} + 4h^2 + 2FT}} \right) \right] = \frac{1}{2} \left[1 - \Phi \left(\frac{1}{\sqrt{\frac{5}{2FT} + \frac{4}{h^2} + \frac{2FT}{h^4}}} \right) \right] \quad (8)$$

З формули випливає, що при рості бази сигналу B , зростає аргумент функції Крампа і це призводить до збільшення ймовірності помилки. Аргумент функції є монотонно зростаючим і не має екстремумів для допустимих значень $h^2 > 0$. З ростом h^2 , відбувається незначне покращення завадостійкості, що в свою чергу сповільнюється з ростом B . Тому при великих значеннях бази сигналу, приріст завадостійкості з ростом h^2 є незначним.

При $h^2 \rightarrow \infty$, ймовірність помилки асимптотично наближається до значень:

$$P_b = \frac{1}{2} \left[1 - \Phi \left(\sqrt{\frac{2B}{5}} \right) \right] \quad (9)$$

Оптимальне значення бази, при якому забезпечується мінімум ймовірності помилки, дорівнює:

$$(FT)_0 = \sqrt{\frac{2B}{5}} h^2 \approx 1,12h^2 \quad (10)$$

При цьому завадостійкість системи буде мати вигляд:

$$P_b = \frac{1}{2} \left[1 - \Phi \left(\frac{h}{2\sqrt{2}} \right) \right] \quad (11)$$

Порівнюючи завадостійкість ШСС та ВСС, бачимо, що при однакових значеннях h^2 вузькосмугові сигнали мають кращу завадостійкість в порівнянні з широкосмуговими. Наприклад, для забезпечення достовірності 10^{-6} для ФМ достатньо значення $h^2=10.5$ дБ.

Одночасно, із графіків (рис.1) видно, що при зростанні бази B , необхідно збільшувати h^2 для досягнення еквівалентної достовірності сигналу.

Для широкосмугового сигналу для забезпечення достовірності 10^{-6} при $B=100$ необхідно забезпечити $h^2 = 19.8$ дБ, при $B=1000 - h^2 = 22.4$ дБ, а при $B=10000 - h^2 = 27$ дБ. Це пояснюється тим, що потужність завад в смузі частот F при використанні ШСС накопичується, в цієї смузі в B раз більше шумів в порівнянні зі смугою вузькосмугового сигналу. Поряд з цим, ця закономірність витікає також із виразу (6).

Подібну закономірність можна побачити й на прикладі іншого виду широкосмугового сигналу.

Для ймовірності помилки для сигналів з кореляційно-часовою модуляцією при автокореляційній системі обробки маємо наступний вираз [1]:

$$p = \frac{1}{2} \left[1 - \Phi \left(\frac{h^2 \sqrt{FT}}{\sqrt{9h^4 + 16h^2 FT + 8(FT)^2}} \right) \right] \quad (12)$$

В автокореляційній системі ймовірність помилки залежить не тільки від відношення енергії сигналу до спектральної щільності флуктуаційної завади h^2 , але і від значень бази $B = FT$ відповідних сигналів.

Залежність ймовірності помилки від h^2 для різних значень бази сигналу подано на рис. 2.

Можна бачити, що й в цьому випадку зростання бази має наслідком зменшення завадостійкості системи передавання сигналів, хоча спосіб модуляції та спосіб обробки сигналу змінено.

Отже, системи з розширенням спектру не дають вигоди в завадостійкості при однакових значеннях енергії сигналу. Оскільки смуга частот є обмеженою і витратною, то розширювати її

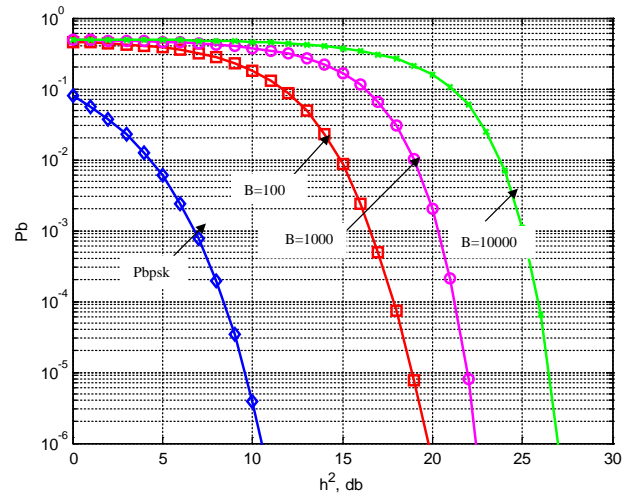


Рис. 1. Порівняння завадостійкості широкосмугового сигналу з активною паузою і протилежними сигналами та вузькосмугового сигналу ФМ з еквівалентною потужністю

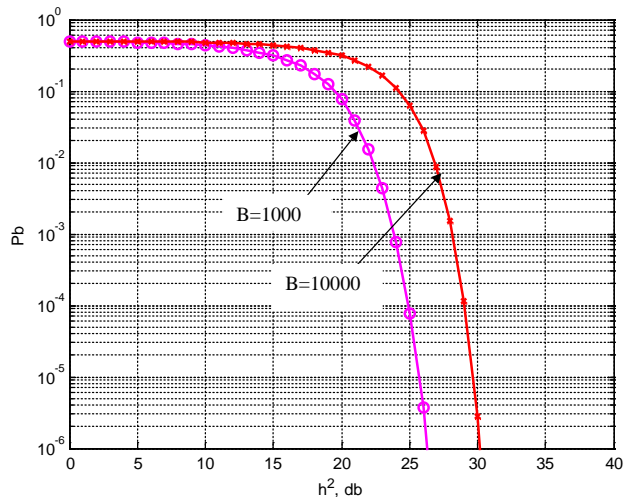


Рис. 2. Завадостійкість ШСС з АКФ з кореляційно-часовою модуляцією

недоцільно при звичайному функціонуванні телекомунікаційної системи. У випадку, коли частоти регламентовані і регулюються, то не може йти річ про взаємні перешкоди в заданій смузі частот.

Використання ШСС доцільне тільки у випадку неорганізованої чи вразливої телекомунікаційної системи (наприклад, при загрозі дії потужних вузькосмугових завад). Тому використання ШСС має сенс з точки зору або досягнення підвищеної скритності (за рахунок зниження в B раз відношення сигнал/завада), або протидії потужній вузькосмуговій заваді. Прикладом такого використання є військова сфера, щоб отримати зв'язок в умовах перешкод з боку противника, а також забезпечити скритність електромагнітних сигналів при невеликій кількості випромінювачів.

Загальна вимога скритності радіозв'язку розпадається на три самостійних вимоги: по-перше, забезпечення скритності самого факту роботи радіолінії (передавача), по-друге, забезпечення скритності факту наявності в даному сигналі інформації; по-третє, забезпечення скритності самої інформації [1].

Всім цим трьома вимогам широкопasmові системи радіозв'язку задовольняють, як правило, в дещо більшою мірою, ніж звичайні, вузькопasmові. Як вже говорилося вище, в широкопasmових системах застосовуються складні сигнали з базою $FT \gg 1$. Виявляється, що при використанні таких сигналів прийом дискретної інформації може здійснюватися при потужності сигналу, що припадає на одиницю смуги частот, меншою спектральної потужності флюктуаційних перешкод у використовуваній смузі частот, тобто передача під шумом. Іншими словами, виявляється можливим вести прийом, коли звичайний вузькопasmовий приймач просто не буде сприймати сигнал [1].

Висновки:

1. Властивість широкопasmовості сигналів не забезпечує кращої достовірності в порівнянні

з вузькопasmовими сигналами при однаковій потужності.

2. При розширенні спектру сигналу накопичується в B раз більше шумів в порівнянні з вузькопasmовими сигналами. Системи з розширенням спектру не дають виграшу в завадостійкості, а являються інструментом забезпечення функціонування системи зв'язку в особливих умовах.

3. Використання широкопasmових сигналів доцільне тільки для протидії вузькопasmовим завадам, які займають тільки частину смуги частот і для забезпечення скритності електромагнітних сигналів у спеціальних сферах використання.

4. Якщо ШСС має обмеження в ресурсі (обмежена енергія сигналу), то вони ведуть до втрати завадостійкості або розтрати ресурсу, коли є намагання відновити вихідну достовірність.

5. Засобом, що дозволяє підвищити достовірність прийому є завадостійке кодування, однак декодер не може розрізнити спосіб обробки сигналу до його входу, тому при рівній енергетиці і однаковій швидкості символів джерела, ВСС мають перевагу і на цьому етапі обробки сигналів.

Список літератури:

1. Uryvsky L.O., Moshynska A.V., Shmihel B.O. Analysis of properties of the wideband signals in the low energy conditions. Sciences Of Europe vol 1. Praha, 2019. № 37. p. 60-63.
2. Бондаренко І.М. Системи радіозв'язку. Кн. 2, ч. 1. Радіолінії зв'язку. Навч. посібник. Харків: ХІ ВПС, 2003. 162с.
3. Мазурков М. І. Основи теорії передавання інформації. Одеса: Наука і техніка, 2005. 168 с.
4. О.В. Корнейко, О.В. Кувшинов, О.П. Лежнюк, С.П. Лівенцев, Л.М. Сакович, Л.О. Уривський. «Основи теорії телекомунікацій»: Підручник / За ред. М. Ю. Ільченка. Київ: Видавництво Інституту спеціального зв'язку та захисту інформації НТУУ «КПІ», 2010. 786 с.
5. Gallager R.G. Information Theory and Reliable Communication. Massachusetts Institute of Technology. New York: John Wiley and Sons, 1968. 720 pp.
6. J.G.Prokis, Masoud Salehi Digital Communication, 5th ed. New York: McGraw-Hill, 2007. 1170 pp.

Shmigel B.O., Grygorenko O.G. ANALYSIS OF THE CHARACTERISTICS OF BROADBAND SIGNALS IN CONDITIONS OF LIMITED ENERGY

The article is devoted to the urgent problem of modern society – meeting the needs for sustainable communication in conditions of low energy of communication lines, interference, and multipath propagation. Wireless networks have a key role in the case of the need for rapid deployment, mobility, flexibility of network organization, in many cases being the only economically viable solution. One of the key tasks of wireless network operation is to ensure reliable and productive information transmission in conditions of limited resources, in particular, energy resources.

In the literature, wideband signals (WBS) are considered as one of the methods for increasing the channel noise immunity, but the properties of such signals under conditions of limited signal resource and energy have not been studied. Compared to narrowband signals (NBS), WBS have many valuable properties: high reliability of information transmission in multipath channels and in congested areas of the range, greater resistance to targeted interference, and better secrecy. WBS have the potential to increase interference immunity, but for their effective use in telecommunications systems, it is necessary to understand their behavior and characteristics in low energy conditions. Therefore, the research topic is relevant.

The paper considers the characteristics of multi-position modulation signals in low energy conditions and compares the efficiency of using signal-code constructions and WBS. To determine the feasibility of using the WBS in low-energy conditions, a model for evaluation of information transmission channels is built and the noise immunity characteristics are compared with the NBS and the equivalent signal energy. Based on the obtained indicators, the impact of WBS on the performance indicators is assessed, and proposals for their implementation and further use are considered.

Key words: noise immunity, BER, broadband, narrowband, energy, Spread spectrum.

ІНФОРМАТИКА, ОБЧИСЛЮВАЛЬНА ТЕХНІКА ТА АВТОМАТИЗАЦІЯ

УДК 621.396:004.89

DOI <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2023.5/16>**Беляков Р.О.**

Військовий інститут телекомунікацій та інформатизації імені Героїв Крут

Фесенко О.Д.

Військовий інститут телекомунікацій та інформатизації імені Героїв Крут

УДОСКОНАЛЕНА МОДЕЛЬ ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОГО УПРАВЛІННЯ ВУЗЛОВИМИ РЕСУРСАМИ КОМУНІКАЦІЙНОЇ МЕРЕЖІ КЛАСУ MANET

Стаття присвячена розробці моделі інтелектуального управління вузловими ресурсами комунікаційної мережі класу MANET. Управління мережами MANET є складним завданням через їхню динамічну природу, високу мобільність вузлів, обмежені ресурси: енергію батареї, технічні характеристики комунікаційних засобів, протоколи різних рівнів моделі OSI, та потребу реалізації функцій управління на вузловому і мережевому рівні в умовах відсутності централізованого контролю. Наукова новизна удосконаленої математичної моделі полягає у впровадженні алгоритму екстремального машинного навчання типу AOS-ELM для формування управляючих рішень на мережевому та фізичному рівні моделі OSI на виконання користувальницьких вимог із забезпечення якості інформаційного обміну.

Процес навчання нейромереж включає використання нової моделі оновлення матриці вагових коефіцієнтів із функцією забування, що додатково зменшує обсяг службової інформації і не потребує надмірності бази знань параметрів комунікаційних вузлів та управляючих рішень як при застосуванні нейронечітких алгоритмів. Проведено формалізацію нейромережевого алгоритму AOS-ELM для формування управляючих рішень для інтелектуального управління вузловими ресурсами комунікаційної мережі класу MANET. Досліджено швидкодію та точність інтелектуальної системи управління за допомогою імітаційного моделювання на наборі синтетичних даних. Встановлено, що застосування алгоритму AOS-ELM забезпечує приріст точності прогнозування параметрів вузлів на 40,3% при порівняно меншому періоді навчання – 30 с, проти 180 с при застосуванні нейронечіткого алгоритму застосованого у вихідній моделі при однакових умовах.

Використання такого підходу може забезпечити ефективне управління мережею, адаптуючись до змін у середовищі та враховуючи різні цільові функції в режимі часу близького до реального.

Ключові слова: комунікаційна мережа, MANET, система інтелектуального управління, нейромережі, екстремальне машинне навчання, прогнозування, оцінка параметрів, вагові коефіцієнти.

Постановка проблеми. Управління мережами класу MANET є складним завданням через їхню динамічну природу, високу мобільність вузлів, обмежені ресурси (наприклад, енергію батареї, технічні характеристики комунікаційних засобів, протоколи різних рівнів моделі OSI, тощо), що в поєднанні із вимогою щодо зменшення рівня централізованого контролю вимагає розробки моделей, методів, методик, алгоритмів для підвищення продуктивності мобільних комунікаційних мереж спеціального призначення.

Для моделювання процесу функціонування мереж такого класу необхідно [1]: по-перше

правильно вибрати модель мобільності серед існуючих або розробити нову що з максимальною реалістичністю описує процес переміщення мобільних вузлів, і відповідатиме умовам функціонування; по-друге визначити сукупність вузлових, каналних, мережевих ресурсів цієї мережі, визначити протоколи маршрутизації задані технічно для вузлових елементів мережі. Проте, результат аналізу публікацій в даній предметній області показав, що на сьогоднішній день залишається актуальним завдання розробки нового або удосконалення існуючого науково-методичного апарату для інтелектуалізації процесу управління

мережами класу MANET, для скорочення обсягів службової інформації, зменшення часу розгортання мереж, забезпечення процесів оперативного управління мережею в реальному часі тощо.

Наукова новизна. Удосконалено математичну модель інтелектуального управління вузловим ресурсом наземної комунікаційної мережі за рахунок застосування нейромережевого алгоритму AOS-ELM, описано особливості реалізації функцій управління, та проведено оцінку ефективності по критерію точності та швидкості формування управляючих рішень.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Моделювання Ad-Hoc мереж є предметом досліджень низки науковців, зокрема автори наукових праць [1–11]. У статті [10] обговорюється ієрархічний принцип управління, в якому головний вузол визначає параметри для підлеглих вузлів. Це може допомогти зменшити обсяг службової інформації, але в динамічних середовищах цей принцип може не забезпечувати оптимальну продуктивність мережі. Разом з тим, автори не зосереджуються на описі способів досягнення енергоефективності або акцентуванні динаміці топології, хоча вони згадують енергоефективність як один з можливих параметрів для оптимізації, вони не обговорюють специфічні стратегії або методи інтелектуального управління. У статті [8] показано підхід планування маршруту в телекомунікаційній мережі на основі нейронної мережі Хопфілда. Переваги цього підходу полягають у здатності нейронних мереж до навчання та адаптації, що може бути корисним для планування маршрутів в складних або динамічних мережах, однак, до недоліків можна віднести не відповідність вимогам до обчислювальних ресурсів [2], крім того, нейронна мережа Хопфілда використовується як централізована система управління, приймає вхідні дані від кожного вузла і видає команди для керування, що може вплинути на часові показники функціонування в реальному часі. Разом з тим, було проаналізовано ряд наукових публікацій, присвячених інтелектуалізації систем управління мережами класу MANET шляхом застосування алгоритмів машинного навчання [5, 7, 8, 10–13]. Так, техніки машинного навчання використовуються для управління параметрами вузлів, в тому числі і для маршрутизації даних. Встановлено, що на ряду із перевагами відносно традиційних протоколів маршрутизації, машинне навчання вимагає великих обсягів вихідних даних, що може викликати суттєві ресурсні витрати.

Таким чином, оптимізація процесів інформаційного обміну в мобільних комунікаційних

мережах шляхом удосконалення інтелектуальних систем управління є перспективним напрямком наукових досліджень.

Метою роботи є удосконалення математичної моделі інтелектуального управління ресурсами наземної комунікаційної мережі класу MANET.

Виклад основного матеріалу. *Вихідні умови функціонування мережі.* Розглядається наземна комунікаційна мобільна радіомережа класу MANET розмірністю до сотні мобільних вузлів, зони переміщення яких попередньо задані відповідно до визначених рангів [1]. Мобільні вузли поділяються на дві основні підгрупи: підгрупа мобільних користувачів (переносні радіозасоби, радіозасоби на транспортних засобах) та підгрупа мобільних базових станцій (наземна комунікаційна роботизована платформа). Наземна комунікаційна мережа не має прив'язки до будь-якої телекомунікаційної інфраструктури загального користування. Кожен мобільний комунікаційний вузол (МКВ) оснащений системою позиціонування, комунікаційним обладнанням, антенними пристроями, системою живлення та відповідною системою управління. Кожен мобільний комунікаційний вузол може бути представлений як об'єкт із системою управління представленою сукупністю агентів навчання із специфічними для кожної підгрупи (МК, МБС) цільовими функціями [3].

Кількість і конкретні задачі оперативного управління визначаються характеристиками і умовами функціонування мережі, а також прийнятими технологічними рішеннями на етапі її проектування [1–3, 5].

Параметри комунікаційної мережі: мережа представляється направленим графом $G^{\psi} = (V^{\psi}, E^{\psi})$, із множиною вершин $V^{\psi} = \{v_i\}$ і множиною ребер $E^{\psi} = \{(v_i, v_j)\}$, $i, j = \overline{1, N_{\psi}}$, $\psi = \overline{1, 3}$ (1 – мережа мобільних вузлів НМ, 2 – мережа мобільних базових станцій, 3 – мережа вузлів повітряного рівня на КА). N_{ψ} – загальна кількість комунікаційних вузлів ψ – го рівня.

Параметри вузла: кожен вузол обладнаний батареєю, ємність якої в кожен момент часу t не може бути вищою за деяке максимальне значення $e_{oi}(t) \leq e_{oimax}$. Вузли МР мають можливість змінювати потужність передавача в залежності від обстановки $p_i^{\psi}(t) \leq p_{max}$ – потужність передачі i -го вузла. Також, приймач кожного мобільного вузла характеризується порогом чутливості p_{min} , яка визначає мінімальну потужність сигналу $p_i^{\psi}(t)$, який може бути прийнятий вузлом. У складі кожного мобільного вузла функціонує інтелектуальна система управління.

Параметри інформаційного обміну: кількість адресатів при кожній сесії – один (однокористувальницька передача); m_{ab} – маршрут між вузлом-відправником та вузлом-адресатом, який складається з h інтервалів ретрансляції ($h = \overline{1, N_\psi - 1}$).

Допущення та обмеження: $N_\psi \leq 80$. Кожен вузол володіє інформацією про сусідні з ним вузли, а також децентралізований принцип управління МР та динамічну природу їх функціонування (часті зміни топології спричинені мобільністю усіх вузлів), множина параметрів, які визначають стан комунікаційного вузла та МР, $X(t) = \{x_\phi(t)\}, \phi = \overline{1, \Phi}$.

Необхідно: здійснити синтез математичної моделі радіозв'язності вузлів комунікаційної мережі, яка, з урахуванням ситуації $X(t)$, що склалася в КМ (чи її зоні ψ – го рівня), дозволить прийняти такі управлінські рішення на фізичному $W_{\text{фіз}}(t)$, та мережевому $W_{\text{мер}}(t)$ рівнях моделі OSI, які відповідатимуть системній цільовій функції

$$W^*(t) = \arg_{W_{\text{фіз}}, W_{\text{мер}}(t) \in \mathbb{C}^V} \text{Ц}^\psi(X^\psi(t), W_{\text{фіз}}(t), W_{\text{мер}}(t)), \forall Z_{i,j} = 1, i, j \in N_\psi, i \neq j, \quad (1)$$

$$\text{де } \text{Ц}^\psi = \{P(t); M(t)\}, \quad (2)$$

$$X^\psi(t) = \{p_{ij}(t), p_{\text{пч}}(t), BER_{\xi_{ij}}(t), m_{ab}, e_{\sigma_i}(t), \xi(t), \xi_{ij}\}, \quad (3)$$

і дозволять мінімізувати витрати енергоресурсу мобільних вузлів та забезпечити задану якість обслуговування ξ -го типу трафіка на маршруті передачі m_{ab} при виконанні обмежень на ресурси мобільних комунікаційних вузлів

$$\Omega = \{p_{\text{пч}} \leq p_{ij}(t) \leq p_{\text{max}}, BER_{\xi_{ij}}(t) \leq BER_{\text{доп}\xi}(t), e_{\sigma_{\text{min}}} \leq e_{\sigma_i}(t) \leq e_{\sigma_{\text{max}}}\}, \quad (4)$$

де $W_{\text{фіз}}(t)$ – множина управляючих рішень вузлової СУ на фізичному рівні моделі OSI щодо вибору оптимальних значень потужності передачі $P(t) = \{p_{ij}(t)\}, i, j \in N_\psi$ в радіоканалі ij ; $W_{\text{мер}}(t)$ – множина управляючих рішень на мережевому рівні моделі OSI щодо вибору оптимальних маршрутів передачі $M(t) = \{m_{ab}(t)\}, a, b \in N_\psi$ між вузлами відправником a та адресатом b або проміжними вузлами i та j на маршруті m_{ab} ; $e_{\sigma_{\text{min}}}(t)$ – мінімально допустима ємність батареї, необхідна для забезпечення передачі потокового трафіка об'ємом, який визначений у межах поточного з'єднання; ξ_{ij} – пріоритет ξ -го типу трафіка в каналі ij

Відповідно до виразів (1-4) на фізичному рівні моделі OSI умову успішної передачі інформації між кожною парою вузлів i та j на маршруті передачі m_{ab} (чи двома вузлами a та b) маємо систему:

$$Z_{i,j} = \begin{cases} 1, BER_{\text{доп}\xi} - BER_{\xi_{ij}}(t) > 0; \\ 0, BER_{\text{доп}\xi} - BER_{\xi_{ij}}(t) \leq 0, \end{cases} \quad (5)$$

де $Z_{i,j}$ – радіозв'язність між вузлами i та j ($i, j \in N_\psi, i \neq j$; $BER_{\xi_{ij}}(t)$ – визначене значення ймо-

вірності помилки для ξ -го типу трафіка в момент часу t ; $BER_{\text{доп}\xi}$ – допустиме значення ймовірності помилки для ξ -го типу трафіка.

Як зазначалося вище, у разі відсутності прямої видимості між відправником та адресатом радіозв'язність може бути забезпечена шляхом побудови маршрутів передачі між ними. Приймаючи до уваги те, що під час передачі інформації маршрутом, який складається з $h, h = \overline{1, N_\psi - 1}$, інтервалів (ретрансляцій), кількість невикористаних помилок на кожному інтервалі буде додаватися, вираз (5) набуває вигляду:

$$Z_{i,j} = \begin{cases} 1, BER_{\text{доп}\xi} - \sum_{h=1}^H BER_{\xi_{ij}}^h(t) > 0; \\ 0, BER_{\text{доп}\xi} - \sum_{h=1}^H BER_{\xi_{ij}}^h(t) \leq 0, \end{cases} \quad (6)$$

де $BER_{\xi_{ij}}^h, h = \overline{1, H}$ – визначене значення ймовірності помилки для ξ -го типу трафіка в момент часу t між двома вузлами на маршруті передачі, які відповідають h -му інтервалу ретрансляції.

У загальному випадку на фізичному рівні взаємодія між двома вузлами в процесі передачі інформації може бути описана наступною системою рівнянь:

$$\begin{cases} BER_{\xi_{ij}}(t) = f(p_{ij}(t), BER_{\xi_{ij}}(t-1)), \\ p_{ij}(t) = g(w_i(t), p_{ij}(t-1)), \end{cases} \quad (7)$$

де $p_{ij}(t), p_{ij}(t-1) \in P(t)$ – потужності вузла-передавача в поточний та попередній моменти часу, відповідно; $BER_{\xi_{ij}}(t)$ та $BER_{\xi_{ij}}(t-1)$ – визначені вузлом-приймачем значення ймовірності помилки, відповідно; $w_i(t) \in W^*(t)$ – управлінське рішення вузла i щодо вибору необхідного значення потужності передавача.

Так як зазначені параметри $X(t) = \{x_\phi(t)\}, \phi = \overline{1, \Phi}$ відносяться до різних рівнів моделі OSI (фізичного та мережевого), то, відповідно до запропонованої в [10] крос-рівневої моделі мережевої архітектури, при якій інформація про множину параметрів $X(t)$ поступає на крос-рівень, який відіграє роль бази даних (знань) службової інформації, у якій міститься інформація про стан вузлів та КМ в цілому, а також правила використання цієї інформації щодо здійснення управління вузловими та мережевими ресурсами. З урахуванням цільової функції (7) прийняття рішень із забезпечення радіозв'язності вузлів:

$$y^*(t) = f(x_1^*, x_2^*, \dots, x_\Phi^*), \phi = \overline{1, \Phi} \quad (8)$$

де $X^* = x_1^*, x_2^*, \dots, x_\Phi^*$ – вектор фіксованих значень змінних в деякий момент часу, які поступають на вхід вузлової ІСУ; y^* – значення вихідної змінної, яка відображає оптимальний управляючий вплив $w^*(t)$

(вибраний рівень потужності передачі або рішення щодо переходу на альтернативний маршрут).

Відповідно до системи рівнянь (7) та цільової функції (1) у якості вхідних змінних системи забезпечення радіозв'язності пропонується використовувати наступні параметри оцінки стану вузла та МР:

$x_1^* = p_{ij}(t-1)$ – потужність вузла-відправника в момент часу $(t-1)$;

$x_2^* = BER_{\zeta ij}(t) - BER_{\zeta ij}(t-1)$ – різниця між значеннями ймовірності помилки для ζ -го типу трафіка, які визначені приймачем в моменти часу (t) та $(t-1)$;

$x_3^* = e_{\delta i}(t), e_{\delta i \min} \leq e_{\delta i}(t) \leq e_{\delta i \max}$ – ємність батареї вузла-адресата (або проміжного вузла на маршруті m_{ab});

$x_4^* = \{v_k\}, k \in N_{\psi}$ – інформація про вузли-сусіди, які в момент часу (t) знаходяться в зоні радіозв'язності i -го вузла ($Z_{ik} = 1$);

$x_5^* = \Pi_{\zeta ij}$ – пріоритет трафіка, який передається в каналі ij .

Для забезпечення швидкодії та точності формування множини управляючих рішень $Y(t)$ інтелектуальної системи управління радіозв'язністю замість алгоритмів нечіткої логіки (використання нечітких правил пропонується застосувати алгоритм екстремального машинного навчання [11].

Методологія дослідження. Було зроблено припущення що існує клас нейромережевих алгоритмів, що використовуються для прийняття управлінських рішень класу ELM (Extremal Learning Machine) (рис. 1), що в деяких модифікаціях дозволить забезпечити суттєво більшу швидкість навчання зі збереженням точності або, навіть, суттєво-більшою точністю обробки вхідних даних для формування рішень управління ресурсами.

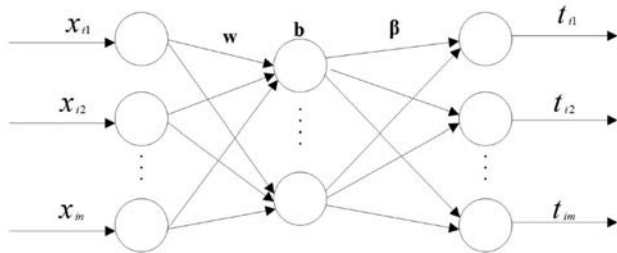


Рис. 1. Структура нейронної мережі класу ELM

У статті [13] було показано порівняння нейромережевого алгоритму AOS-ELM (від англ. Adaptive Online Sequential Extreme Learning Machine), та нейронечіткого алгоритму. Визначено, що алгоритм AOS-ELM на відміну від нейронечіткого алгоритму показує кращі адаптивні властивості в задачах прогнозування в нестационарних динамічних умовах, та зменшує вплив архаїчних і надмірних

даних в процесі навчання в реальному часі за рахунок механізмів забування та фільтрації. Застосування алгоритму нечіткої логіки в аналогічних задачах, показав значно гіршу точність в процесі обчислення даних, крім того, нейронечіткий алгоритм пред'являє високі обчислювальні вимоги, що призводить до збільшення часу навчання.

Формалізація нейромережевого алгоритму AOS-ELM для формування управляючих рішень.

1. Ініціалізація параметрів алгоритму, такі як розмір прихованого рівня (кількість нейронів) L , функція активації $g(\cdot)$, поріг забуття λ тощо.

2. Генерація випадкової матриці вхідних вагових коефіцієнтів $W \in R^{L \times d}$ та вектора зміщення $b \in R^L$ для прихованого шару, де d – розмірність вхідних даних ($X_{\phi}^* = \{X_1, X_2, \dots, X_d\}, X^* = x_1^*, x_2^*, \dots, x_{\phi}^*$).

3. Формування першого блоку вхідних даних $X_1 \in R^{N_1 \times d}$ та визначення матриці цільових значень $T_1 \in R^{N_1 \times m}$, де N_1 – кількість зразків (семплів) у блоці, а m – розмірність вихідних даних. Обчислення вихідного значення прихованого шару за допомогою функції активації

$$H_1 = g(X_{1W^T} + b). \quad (9)$$

4. Обчислення вихідних вагових коефіцієнтів за допомогою псевдоінверсної матриці або іншого методу найменших квадратів

$$\beta_1 = (H_1^{TH_1})^{-1} H_1^{TT}. \quad (10)$$

5. Обчислення помилки прогнозу на поточному блоці даних та оновлення середнього значення помилки $\bar{\epsilon}_1 = \epsilon_1$:

$$\epsilon_1 = \frac{1}{N_1} \sum_{i=1}^{N_1} |T_i - H_i \beta_1|^2. \quad (11)$$

6. Отримання наступного блоку даних $X_t \in X_{\phi}^* \in R^{N_t \times d}$ та цільових значень $T_t \in R^{N_t \times m}$, де t – індекс блоку. Обчислення виходів прихованого шару $H_t = g(X_{tW^T} + b)$ за допомогою функції активації.

7. Обчислення вихідних вагових коефіцієнтів для t -го блоку вхідних даних за (10) за допомогою рекурсивного методу найменших квадратів, де λ – коефіцієнт забуття та $\beta t - 1^{-T}$ – псевдоінверсна матриця до $\beta t - 1$:

$$\beta t = (\beta t - 1^{-T+1} + \lambda H_t^{TH_t})^{-1} (\lambda H_t^{TT} t + \beta t - 1^{-T}). \quad (12)$$

8. Обчислення помилки прогнозу на поточному блоці даних та оновлення значення середньої помилки $\bar{\epsilon} = (t-1) \frac{\bar{\epsilon} t - 1}{t} + \frac{\epsilon_t}{t}$:

$$\epsilon_t = \frac{1}{N_t} \sum_{i=1}^{N_t} |T_i - H_i \beta_t|^2 \quad (13)$$

9. Перевірка, чи існує приблизна лінійна залежність ALD (від англ. Approximate linear dependence)

між новими та старими даними (блоками даних). Якщо так, то відкинути нові дані, оскільки вони не несуть корисної інформації. Для цього можна використовувати наступний критерій: якщо $|\rho| > 0.95$, де A – коефіцієнт кореляції Пірсона між H_t та H_{t-1} , то вважати, що існує ALD.

10. Застосування гібридного механізму забуття HFМ (від англ. Hybrid Forgetting Mechanism), який враховує як часову, так і просторову інформацію про дані. Якщо так, то зменшити вплив застарілих даних на вихідні вагові коефіцієнти за допомогою коефіцієнта забуття λ :

$$\lambda = \frac{\bar{\alpha}}{\bar{\alpha} - 1}, \quad (14)$$

де $\bar{\alpha}$, та $\bar{\alpha} - 1$ – середні помилки на поточному та попередньому блоках даних.

11. Повторення кроків 6–10, поки не відбудеться зміна концепції або на вимогу зупинки навчання.

Дані вектору переміщення мобільних комунікаційних вузлів x_i^* зібрані за допомогою моделі мобільності [1], та було здійснено моделювання процесу комунікаційного обміну за допомогою мови програмування Python із вихідними даними перерахованими вище для трьох алгоритмів – AOS ELM, FOS ELM (Fuzziness-based Online Sequential Extreme Learning Machine) [7] та Fuzzy (алгоритм нечіткої логіки). Результат моделювання підтверджує гіпотезу про суттєве скорочення часу навчання та підвищення точності прогнозування параметрів стану комунікаційних вузлів.

Із графіку (рис. 2) легко помітити, що застосування алгоритму AOS-ELM забезпечує приріст точності прогнозування параметрів вузлів на 40,3% при порівняно меншому періоді навчання –

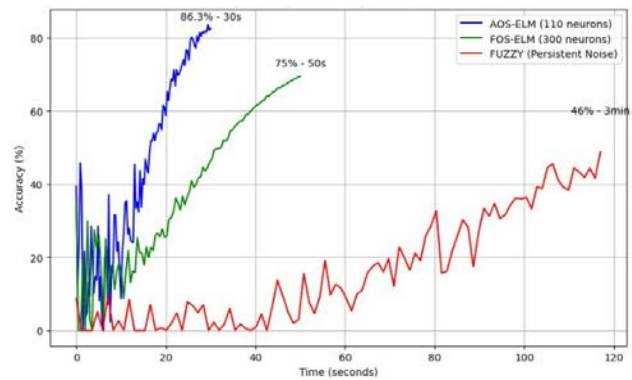


Рис. 2. Графіки точності та часу навчання процесу формування управляючих рішень комунікаційної мережі класу MANET

30 с, проти 180 с при застосуванні Fuzzy-нечіткого алгоритму застосованого у вихідній моделі при однакових умовах.

Висновки. У статті представлено удосконалену математичну модель інтелектуального управління вузловими ресурсами комунікаційної мережі класу MANET, проведено формалізований опис алгоритму формування вхідних даних системи управління побудованої на основі алгоритму AOS ELM.

Визначальною особливістю застосування такого класу нейромережевих алгоритмів є наявність функції забування, що впливає на зменшення службової інформації про параметри вузлів шляхом відкидання неактуальних даних.

Використання інтелектуальної системи управління побудованої за допомогою запропонованої моделі дозволяє забезпечити процес формування управляючих рішень в складних динамічних умовах – швидкозмінній топології комунікаційної мережі.

Список літератури:

1. Беляков Р. О., Фесенко О. Д. Модель мобільності наземної комунікаційної мережі спеціального призначення. COMPUTER-INTEGRATED TECHNOLOGIES: EDUCATION, SCIENCE, PRODUCTION. 2023. № 51. С. 130–138. URL: <https://doi.org/10.36910/6775-2524-0560-2023-51-17>.
2. Концепція ієрархічної побудови інтелектуальних систем управління тактичними радіомережами класу MANET. / В. А. Романюк та ін. Збірник тез доповідей Міжнародної кримської конференції «НВЧ-техніка та телекомунікаційні технології», КриМіКо. 2012. С. 265.
3. Романюк В. А. Цільові функції оперативного управління тактичними радіомережами. Збірник наукових праць ВІТІ НТУУ «КПІ». 2012. № 1. С. 109–117.
4. Романюк В.А. Архітектура системи оперативного управління тактичними радіомережами / В.А. Романюк // Збірник наукових праць ВІТІ НТУУ «КПІ». 2009. № 3. С. 70–76.
5. Enhancing Vehicular Ad Hoc Networks' Dynamic Behavior by Integrating Game Theory and Machine Learning Techniques for Reliable and Stable Routing / N. Phull et al. *Security and Communication Networks*. 2022. Vol. 2022. P. 1–11. URL: <https://doi.org/10.1155/2022/4108231>.
6. Implementation of Mobility Management Methods for MANET / J. Hosek et al. *International Journal of Advances in Telecommunications, Electrotechnics, Signals and Systems*. 2012. Vol. 1, no. 2-3. URL: <https://doi.org/10.11601/ijates.v1i2-3.39>.

7. Fuzziness-based online sequential extreme learning machine for classification problems / W. Cao et al. *Soft Computing*. 2018. Vol. 22, no. 11. P. 3487–3494. URL: <https://doi.org/10.1007/s00500-018-3021-4> (date of access: 13.09.2023).
8. Model of data flow control subsystem of the MANET class mobile radio network control system / Yuliia Kramaska, Serhii Salnyk, Serhii Vasylenko, Olena Mavrina // *Scientific Journal of TNTU*. – Tern. : TNTU, 2022. – Vol. 107. – No 3. – P. 51–59.
9. Romaniuk V. A., Bieliakov R. O. Objective control functions of FANET communication nodes of land-air network. *COMPUTER-INTEGRATED TECHNOLOGIES: EDUCATION, SCIENCE, PRODUCTION*. 2023. No. 50. P. 125–130. URL: <https://doi.org/10.36910/6775-2524-0560-2023-50-19>.
10. The hierarchical model of interaction between intelligent agents in the MANET control systems / O. Y. Sova et al. *Information and Telecommunication Sciences*. 2015. No. 1. P. 21–28. URL: <https://doi.org/10.20535/2411-2976.12015.21-28>.
11. Yang R., Xu S., Feng L. An Ensemble Extreme Learning Machine for Data Stream Classification. *Algorithms*. 2018. Vol. 11, no. 7. P. 107. URL: <https://doi.org/10.3390/a11070107> (date of access: 13.09.2023).
12. Zhebka V. V. Research of machine learning methods and their application for forecasting use outflow by telecommunications services. *Connectivity*. 2020. Vol. 146, no. 4. URL: <https://doi.org/10.31673/2412-9070.2020.042231>.
13. Zhang J., Li Y., Xiao W. Adaptive online sequential extreme learning machine for dynamic modeling. *Soft Computing*. 2020. URL: <https://doi.org/10.1007/s00500-020-05289-6> (date of access: 13.09.2023).

Bieliakov R.O., Fesenko O.D. IMPROVED MODEL OF INTELLIGENT MANAGEMENT OF NODE RESOURCES OF THE TERRESTRIAL COMMUNICATION NETWORK OF THE MANET CLASS

The article is devoted to the development of a model of intelligent management of nodal resources of the MANET communication network. Management of MANET networks is a complex task due to their dynamic nature, high mobility of nodes, limited resources: battery power, technical characteristics of communication tools, protocols of different levels of the OSI model, and the need to implement control functions at the node and network level in the absence of centralized control. The scientific novelty of the improved mathematical model consists in the introduction of an extreme machine learning algorithm of the AOS-ELM type for the formation of control decisions at the network and physical level of the OSI model to fulfill user requirements for ensuring the quality of information exchange.

The learning process of neural networks includes the use of a new model of updating the matrix of weight coefficients with a forgetting function, which additionally reduces the volume of service information and does not require the redundancy of the knowledge base of the parameters of communication nodes and control decisions, as in the case of neurofuzzy algorithms. The formalization of the AOS-ELM neural network algorithm was carried out for the formation of control solutions for the intelligent management of nodal resources of the MANET class communication network. The speed and accuracy of the intelligent control system were investigated using simulation modeling on a set of synthetic data. It was established that the application of the AOS-ELM algorithm provides an increase in the accuracy of forecasting node parameters by 40.3% with a relatively shorter training period of 30 s, compared to 180 s when using the neurofuzzy algorithm used in the original model under the same conditions.

Using such an approach can provide effective network management by adapting to changes in the environment and considering various objective functions in near-real-time.

Key words: communication network, MANET, intelligent control system, neural networks, extreme machine learning, prediction, parameter estimation, weighting factors.

УДК 621.317

DOI <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2023.5/17>**Бурау Н.І.**Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»**Осовцев А.В.**Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

АНАЛІЗ ЕФЕКТИВНОСТІ СИСТЕМИ СТАБІЛІЗАЦІЇ ОБЛАДНАННЯ МОБІЛЬНОГО МІНІ-РОБОТА НА МІСЦЕВОСТІ ЗІ СКЛАДНИМ ПРОФІЛЕМ

Статтю присвячено розробці системи стабілізації та наведення обладнання (цифрові камери, радары, антени, лазерні далекоміри, оптико-електронні модулі різного призначення), встановленого на малорозмірних наземних мобільних роботах колісного типу. Такі об'єкти мають проблеми у подоланні перешкод під час руху по місцевості зі складним профілем, по бездоріжжю, піщаних та в'язких поверхнях, тому системи стабілізації повинні забезпечити ефективне використання встановленого обладнання у широкому діапазоні швидкостей руху, умов та профілю місцевості.

В роботі проведено моделювання збурень, які впливають на встановлене обладнання при русі мобільного робота місцевістю зі складним профілем нерівностей. Згенеровано випадкові збурення для різних класів доріг, та з додатковими імпульсними збуреннями. Для дослідження розроблено схему моделювання системи стабілізації в пакеті Matlab Simulink. Проведено дослідження системи, побудованої за базовою схемою, та з введеним ПІ-регулятором. Отримано часові реалізації реакції системи стабілізації на згенеровані випадкові збурення, визначено їх спектральні щільності потужності, середньоквадратичні відхилення значень вихідної величини, визначено максимальне значення кута відхилення місця встановлення обладнання від площини горизонту, як максимальної похибки стабілізації. Проведено порівняльний аналіз максимальної похибки стабілізації, отриманої для різних профілей місцевості руху та для різних схем побудови системи стабілізації. Встановлено, що система з ПІ-регулятором забезпечує прийнятне значення похибки стабілізації для усіх розглянутих типів збурень. Отримані результати будуть використані для розробки адаптивної цифрової системи стабілізації обладнання, встановленого на мобільних роботах.

Ключові слова: мобільні роботи, система стабілізації, моделювання, нерівності, випадкові збурення, похибка стабілізації.

Постановка проблеми. Розвиток робототехніки загалом і мобільної робототехніки зокрема обумовив стрімке впровадження мобільних роботів практично в усіх сферах людського життя та суспільного виробництва, у пошукових та військових місіях [1]. Мобільні роботи (МР) використовуються у різних фізичних середовищах, які характеризуються специфічними умовами експлуатації та динамічним впливом, що обумовлюють особливості руху МР, необхідності долати перешкод, вимоги стійкості та маневреності. Класифікація МР проводиться за їх призначенням, середовищем експлуатації та основними характеристиками [1; 2]. Для МР основною проблемою і характеристикою є спосіб переміщення, тому в найбільш загальному випадку МР можна класифікувати за типом руху, як: стаціонарні (мані-

пулятори); водні та підводні; наземні (колісні, гусеничні, крокові, гібридні); повітряні (безпілотні літальні апарати). Для кожного з наведених типів, як зазначено в [3], можна виділити клас МР багатоцільового призначення, які можуть застосовуватись для виконання декількох (двох і більше) завдань. Крім того, значного поширення набувають модульні МР, які складається з частин, що мають незалежні функції, але здатні взаємодіяти між собою різними способами, що призводить до іншої конфігурації МР з новими можливостями [4]. Такі властивості реконфігурації забезпечують універсальність, розширюють можливості багатоцільового призначення МР та підвищують їх відмовостійкість.

Серед наземних багатоцільових МР найбільш розповсюдженими є колісні, до переваг яких

відносяться: найдешевша серед інших типів розробка; простота в керуванні та балансуванні; широкий діапазон швидкостей руху; маневреність. Але для таких об'єктів існують певні проблеми у подоланні перешкод під час руху по місцевості зі складним профілем, по бездоріжжю, піщаних та в'язких поверхнях. Значною мірою різноманітність умов та профілю місцевості впливають на ефективність експлуатації мобільних міні-роботів (розміри за трьома вимірами не перевищують 0,5 м). На таких МР багатозначного призначення у якості обладнання можуть встановлюватись цифрові камери, радары, антени, лазерні далекоміри, оптико-електронні модулі різного призначення. Для ефективного використання встановленого обладнання в умовах комплексних збурень, які зумовлені динамікою та типом руху самого рухомого об'єкту, вібрацією, зовнішніми неконтрольованими збуреннями, недоліками встановлення обладнання на об'єкті, необхідно забезпечити його стабілізацію. В якості вимог до точності стабілізації обладнання використовується значення кута відхилення його місця встановлення від площини горизонту [5], яке не повинно перевищувати 0,35 мрад (0,02 градуса). Тому для наземних МР, у тому числі малорозмірних, актуальною лишається проблема вдосконалення існуючих та розробка нових систем стабілізації встановленого обладнання для ефективного використання його під час руху МР у широкому діапазоні швидкостей, умов та профілю місцевості.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Аналіз шляхів удосконалення існуючих наукових підходів та технічних рішень для створення адаптивної прецизійної цифрової системи стабілізації та наведення обладнання для рухомих об'єктів як морського, так і наземного базування, наведено в [6]. Проаналізовано та обґрунтовано шляхи вдосконалення елементної бази та алгоритмів керування існуючих систем стабілізації та наведення, показано перспективність використання інерційних вимірювальних модулів, побудованих за MEMS технологією, та алгоритмів адаптивного керування з використанням штучних нейронних мереж.

У статті [7] досліджуються методичне, апаратне та алгоритмічне забезпечення, яке використовується для навігації МР, зокрема при русі у різних середовищах та подоланні перешкод. Проведено аналіз моделей датчиків і кінематики робота, розглядаються методи подолання чи огинання стаціонарних та рухомих перешкод, пропонуються алгоритми навігації на основі прогнозування та ковзного режиму керування. Інерційні вимірю-

вальні модулі, побудовані за MEMS технологією, наприклад, AHRS (Attitude and Heading Reference Systems – системи визначення кутового положення), можуть бути основою для створення двовісної системи непрямої стабілізації обладнання на рухомому об'єкті [5]. Сутність непрямого методу стабілізації полягає в перетворенні кутових координат, що характеризують задане положення осі обладнання в земній системі координат, у відповідні кутові координати (параметри стабілізації) в пов'язаній з рухомим об'єктом системі координат для їх подальшого відпрацювання виконавчим механізмом [5]. Це дозволяє використовувати інформацію вимірювального модуля AHRS і для визначення параметрів орієнтації МР і для стабілізації встановленого на ньому обладнання.

В роботі [8] розглянуто основні принципи моделювання системи з цифровим блоком керування, призначеної для стабілізації обладнання наземного рухомого об'єкта. Для неперервних прототипів системи наведено спосіб представлення дискретних одиниць, проаналізовано основні відмінності моделей системи стабілізації на етапах синтезу та аналізу отриманих результатів, за результатами моделювання проаналізовано перехідні процеси по кутовій швидкості, які отримано з різними способами дискретизації.

Варіант побудови цифрової системи стабілізації платформи антенного поля, яка розміщується на рухомому об'єкті, наведено та обґрунтовано у праці [9]. Автори обґрунтовують структурні схеми, вибір параметрів системи, наводять розрахунки кутових швидкостей, моментів інерції, навантажувальних моментів. Запропонована система є багатоканальною і забезпечує необхідні показники якості. А в роботі [10] для забезпечення потрібних параметрів стабілізації інформаційно-вимірювальних пристроїв, встановлених на рухомому об'єкті, запропоновано структурно-параметричний синтез цифрової системи стабілізації на основі робастного керування. Розроблено алгоритм структурно-параметричного синтезу, наведено результати моделювання синтезованої системи, які підтвердили ефективність розробленого алгоритму.

У статті [11] розглянуто задачу вибору значень змінюваних параметрів стабілізатора рухомого об'єкту для забезпечення мінімуму адитивного квадратичного інтегрального функціоналу, враховуючого комплекс вимог до замкнутої системи стабілізації. Для розв'язання поставленої задачі запропоновано комбінований метод параметричного синтезу стабілізатора, проведено розрахунки

вагових коефіцієнтів, отримано рішення задачі параметричного синтезу, результати якого показують можливість досягнення прийнятної точності стабілізації.

Для забезпечення високих показників точності та швидкодії в системах керування, у тому числі в системах стабілізації, використовуються регулятори, побудовані як на класичних методах теорії автоматичного керування, так і на основі нечіткої логіки та з використанням нейронних мереж. У працях [12; 13] авторами запропоновано та обґрунтовано використання нейромережевих регуляторів для досягнення показників якості керування в системах стабілізації. Розроблено структурні схеми, проведено моделювання, виконано програмно-апаратну реалізацію системи керування на мікроконтролері.

Аналіз літературних джерел показав, що проблема стабілізації та наведення різного за своїм призначенням обладнання на рухомих об'єктах є актуальною. При розробці систем стабілізації проводиться аналіз їх динамічних характеристик за звичай при типових вхідних збуреннях. Але рух малорозмірних МР по місцевості складного профілю генерує складні випадкові збурення на місце встановлення обладнання, тому при розробці системи стабілізації важливим етапом є дослідження її реакції не лише на типові, але й на випадкові збурення, які характеризують вплив на об'єкт різних типів та якості дорожнього покриття. В статті [14] проведено дослідження впливу нерівностей доріг на параметри двовісної системи непрямої стабілізації обладнання, що розміщується на гусеничних наземних об'єктах під час руху. Для цього було визначено залежності динамічних характеристик рухомого об'єкту від збурень, що створюються зовнішнім середовищем, зокрема профілем місцевості, та проаналізовано, яким чином зміна факторів зовнішніх збурень впливає на динаміку руху об'єктів стабілізації та параметри системи стабілізації.

У попередній роботі [15] авторами створено модель повно розмірного колісного рухомого об'єкта та виконано моделювання його руху по дорогах з типовими профілями, в результаті визначено динамічні збурення місця встановлення системи стабілізації обладнання, проведено моделювання системи стабілізації та аналіз її реакції на деякі випадкові динамічні збурення, обумовлені типовими нерівностями поверхні руху об'єкта. Але зазначені дослідження потребують подальшого продовження з метою розробки такої системи, яка б забезпечувала стабілізацію встановленого обладнання для ефективного вико-

ристання його під час руху малорозмірних МР у певному діапазоні швидкостей та режимів руху, на пагорбкуватій та пересіченій місцевості з високим ступенем нерівностей і ділянками з неоднорідним ґрунтом та включеннями з різним ступенем щільності.

Метою статті є моделювання та аналіз ефективності системи стабілізації обладнання, встановленого на малорозмірному наземному МР колісного типу, який рухається місцевістю зі складним профілем нерівностей.

Виклад основного матеріалу

Моделювання збурень при русі МР місцевістю зі складним профілем нерівностей

Нерівності доріг чи поверхні руху об'єкта визначаються їх рельєфом, який в літературі розглядається як сукупність реалізацій випадкових поверхонь для твердої ділянки дороги, за якими можна визначити характеристики нерівностей [15; 16]. Профілем дороги є перетин рельєфу в напрямку руху транспортного засобу. Перетин поверхні конкретної ділянки дороги є реалізацією профілю, а сукупність таких реалізацій дозволяє розглядати профіль дороги як випадковий процес. Зазвичай профіль нерівностей доріг описується випадковою функцією висоти нерівностей дороги, яка може залежати від довжини, тобто пройденої відстані, або часу. Висота нерівностей є випадковою величиною, що має нормальний закон розподілу ймовірності. Тоді профіль описується стаціонарним випадковим процесом з нормальним розподілом висоти нерівностей для будь-якого часового перетину чи значення пройденої відстані [15; 16].

Для моделювання профілю дороги застосовувалась класифікація доріг за рівнем нерівностей за стандартом ISO 8608 [14; 15], відповідно до якого випадкові нерівності для різних типів доріг визначені на основі спектральної щільності потужності S_0 , що є функцією просторової частоти (число коливань на 1 метр шляху). Класи доріг та відповідні їм значення рівня нерівностей наведено в табл. 1.

Для моделювання обрано такі три класи доріг (табл. 1): А (дуже добра дорога, рівень нерівностей – 2×10^{-6}); D (погана дорога, рівень нерівностей – 200×10^{-6}); F (дуже складна для руху дорога, рівень нерівностей – 2000×10^{-6}). Моделювання проводилось за умови, що МР рухається з постійною швидкістю, яка дорівнює 5 км/год (1,4 м/с), час моделювання складав 100 с з періодом дискретизації 0,05 с, а пройдений шлях, відповідно склав 140 м. Для обраних класів доріг було згенеровано

реалізації випадкових збурень – випадкових стаціонарних процесів з обмеженим за частотою до 10 Гц спектром.

Таблиця 1

Класифікація доріг за рівнем нерівностей відповідно до стандарту ISO 8608 [14; 15]

Клас дороги	Рівень нерівності, $S_0(\times 10^{-6} \text{ м}^3/\text{коливання})$
A (дуже добра)	<8
B (добра)	8-32
C (задовільна)	32-128
D (погана)	128-512
E (дуже погана)	512-2048
F	2048-8192
G	8192-32768
H	>32768

Додатково були сформовані комплексні збурення шляхом додаткового внесення в кожну з утворених реалізацій двох прямокутних імпульсних збурень з такими параметрами: величина прямокутного імпульсу 0,1 м; тривалість – 0,5 с (0,7 м). Перший прямокутний імпульс згенеровано у часовому інтервалі 39,45 с – 39,95 с, а другий – у часовому інтервалі 77,65 с – 78,15 с. Приклади сформованих реалізацій збурень та їх спектрів наведено на рис.1 (для профілю класу дороги D) та рис. 2 (для профілю класу дороги D з додатковими двома імпульсними збуреннями).

Таким чином, всього для моделювання системи стабілізації згенеровано 6 типів збурень при русі МР, які обумовлені місцевістю зі складним профілем нерівностей, з яких 3 типи збурень від-

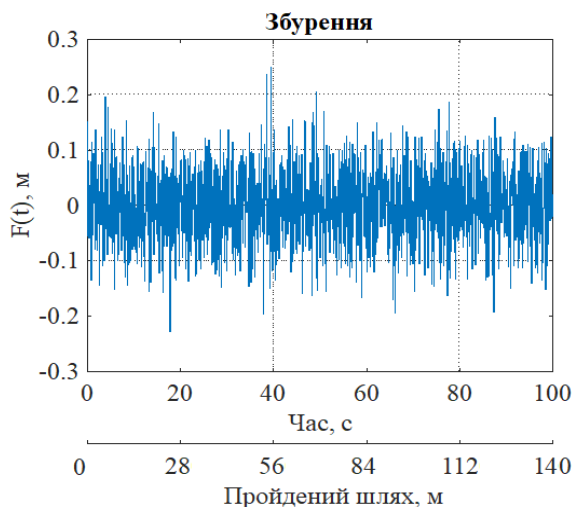
повідають трьом класам доріг (A, D, F) і 3 типи збурень відповідають тим самим класам доріг з двома додатковими імпульсними збуреннями, параметри яких є однаковими для усіх згенерованих реалізацій випадкових збурень.

Моделювання та аналіз реакції системи стабілізації на випадкові збурення, обумовлені нерівностями поверхні руху об'єкта

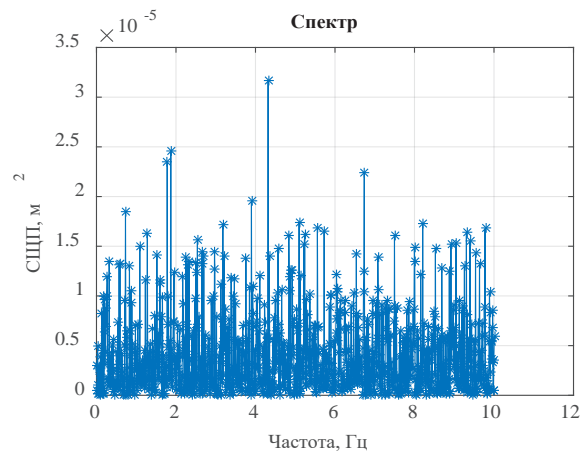
Для моделювання та аналізу ефективності стабілізації обладнання при розглянутих вище збуреннях використано розглянуту в [15] систему стабілізації обладнання, до складу якої входять перетворюючі пристрої, корегуючий пристрій, підсилювач, виконавчий двигун, редуктор. Таку базову структуру (з відповідними параметрами) розроблено для забезпечення потрібних показників стійкості та якості перехідного процесу системи. Для підвищення точності стабілізації до складу системи можуть бути введені регулятори, наприклад, пропорційно-інтегруючий (ПІ) регулятор.

Для моделювання системи в пакеті Matlab Simulink було розроблено схему (рис. 3) з використанням стандартних блоків пакету (Gain, Constant, Integrator, Transfer Fcn, Scope, Sum, Random Number), випадкове збурення задається через канал збурення за допомогою блоку From Workspace Вхідний сигнал є нульовим, тоді реакція системи на збурення буде похибкою системи стабілізації.

Моделювання реакції системи стабілізації на випадкові збурення проведено для базової структури системи та структури з ПІ-регулятором (позначений пунктиром на рис.1 блок Izodrom).



а)



б)

Рис. 1. Часова реалізація збурення (а) для профілю класу дороги D та його спектр (б)

В процесі моделювання для кожної розглянутої структури системи стабілізації отримано реакції на сформовані, як було описано вище, 6 типів збурень.

У якості прикладу на рис. 4 наведено результати моделювання системи стабілізації при випадковому збуренні під час руху МР по місцевості з профілем, що відповідає класу дороги D (рис. 1), а на рис. 5 – результати моделювання при випадковому збуренні для профілю того самого класу D з двома додатковими імпульсними збуреннями (рис. 2).

Результати моделювання наведено у вигляді часових реалізацій реакції системи стабілізації $\varphi_{\text{вих}}(t)$ з базовою структурою та з додатково введеним ПІ-регулятором, а також відповідних графіків спектральної щільності потужності реакції системи $S_{\varphi}(f)$, як функції циклічної частоти.

За результатами проведеного моделювання розраховано значення середньоквадратичних відхилень для реалізацій вхідних випадкових збурень σ_F та відповідних вихідних сигналів системи σ_{φ} для розглянутих класів доріг з нерівностями, а також розраховано максимальне значення кута відхилення місця встановлення обладнання від площини горизонту (табл. 2).

Як показали результати моделювання, в загальному випадку досліджувана система є ефективною для стабілізації обладнання, встановленого на МР, які рухаються місцевістю з нерівностями відповідно до розглянутих класів доріг та додаткових збурень.

В умовах руху МР місцевістю з нерівностями відповідно до розглянутих класів доріг та додатко-

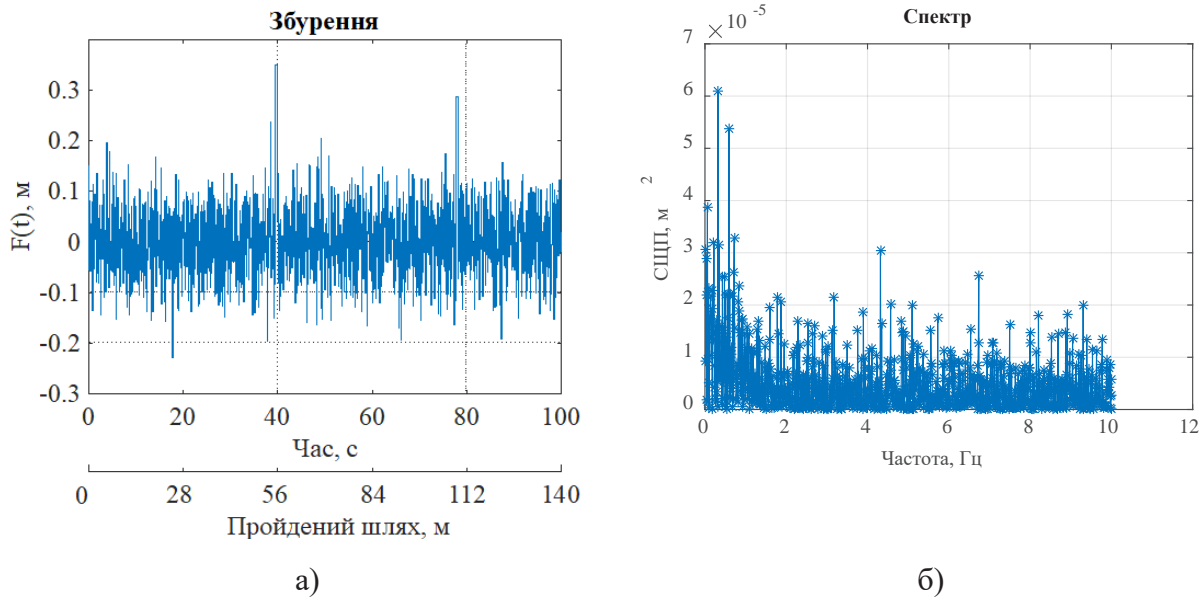


Рис. 2. Часова реалізація збурення (а) для профілю класу дороги D з додатковими двома імпульсними збуреннями та його спектр (б)

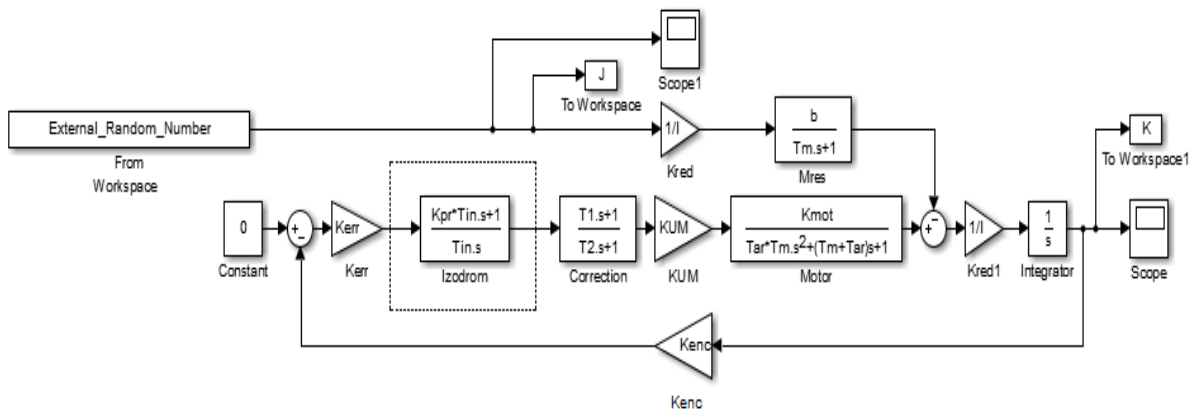


Рис. 3. Схема моделювання реакції системи стабілізації на випадкові збурення

Значення середньоквадратичних відхилень для реалізацій вхідних випадкових збурень σ_F та вихідних сигналів системи σ_ϕ , максимальне значення кута відхилення місця встановлення обладнання

Випадкове збурення	Структура системи	$\sigma_F, м$	$\sigma_\phi, м$	Кут відхилення, град
Профіль класу дороги А	Базова	$6,3 \times 10^{-3}$	$1,7615 \times 10^{-6}$	$1,5 \times 10^{-3}$
	з ПІ-регулятором	$6,3 \times 10^{-3}$	$2,1033 \times 10^{-7}$	$2,2549 \times 10^{-4}$
Профіль класу дороги А з імпульсними збуреннями	Базова	$1,36 \times 10^{-2}$	$7,4992 \times 10^{-6}$	$1,91 \times 10^{-2}$
	з ПІ-регулятором	$1,36 \times 10^{-2}$	$3,6266 \times 10^{-7}$	1×10^{-3}
Профіль класу дороги D	Базова	$6,32 \times 10^{-2}$	$1,7615 \times 10^{-5}$	$1,47 \times 10^{-2}$
	з ПІ-регулятором	$6,32 \times 10^{-2}$	$2,1311 \times 10^{-6}$	$2,3 \times 10^{-3}$
Профіль класу дороги D з імпульсними збуреннями	Базова	$7,03 \times 10^{-2}$	$2,6265 \times 10^{-5}$	$5,36 \times 10^{-2}$
	з ПІ-регулятором	$7,03 \times 10^{-2}$	$2,2472 \times 10^{-6}$	$3,1 \times 10^{-3}$
Профіль класу дороги F	Базова	0,1998	$5,5695 \times 10^{-5}$	$4,65 \times 10^{-2}$
	з ПІ-регулятором	0,1998	$6,7452 \times 10^{-6}$	$7,1 \times 10^{-3}$
Профіль класу дороги F з імпульсними збуреннями	Базова	0,2136	$7,3808 \times 10^{-5}$	0.1366
	з ПІ-регулятором	0,2136	$6,9499 \times 10^{-6}$	$8,4 \times 10^{-3}$

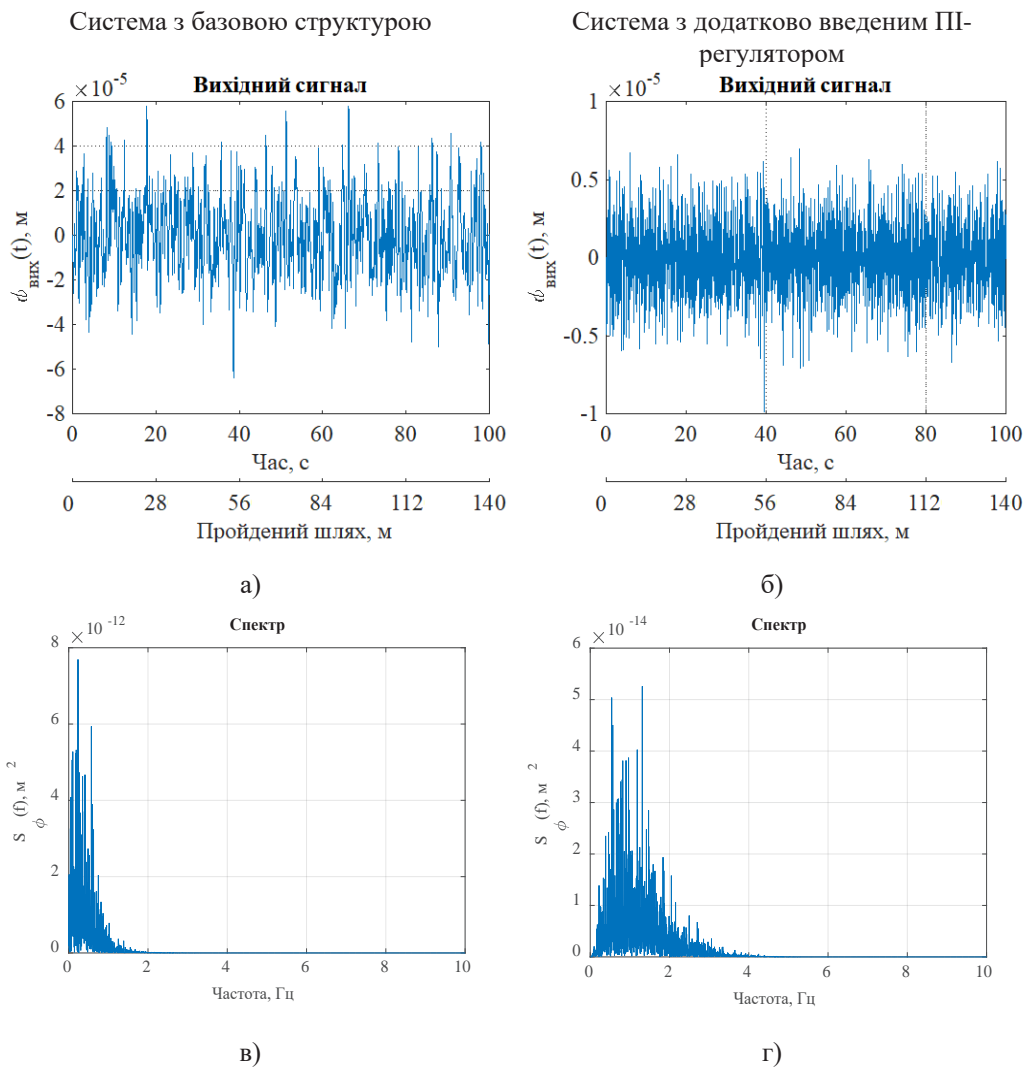


Рис. 4. Результати моделювання системи стабілізації при випадкових збуреннях, обумовлених нерівностями дороги класу D: а) реакція системи з базовою структурою; б) реакція системи з ПІ-регулятором; в) спектр вихідного сигналу системи з базовою структурою; г) спектр вихідного сигналу системи з ПІ-регулятором

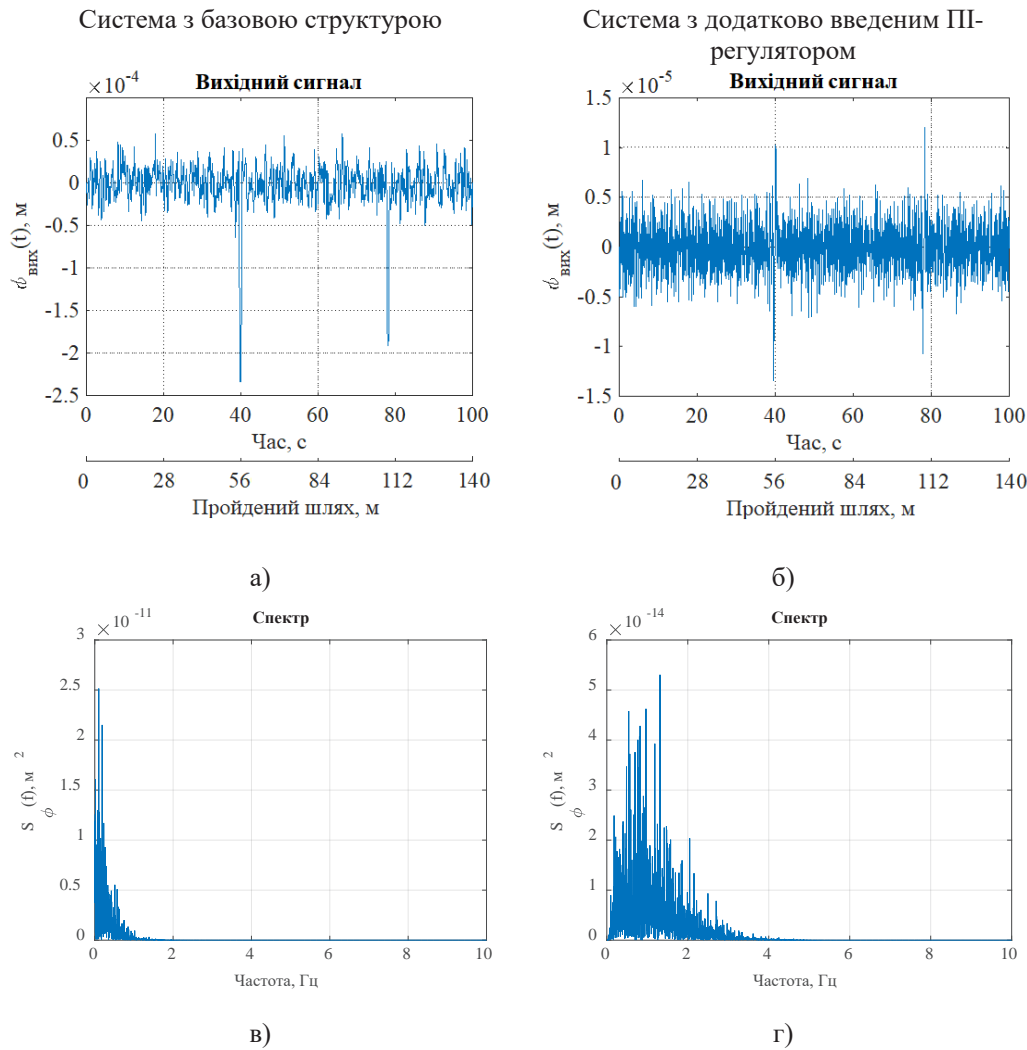


Рис. 5. Результати моделювання системи стабілізації при випадкових збуреннях, обумовлених нерівностями дороги класу D, та з двома додатковими імпульсними збуреннями: а) реакція системи з базовою структурою; б) реакція системи з ПІ-регулятором; в) спектр вихідного сигналу системи з базовою структурою; г) спектр вихідного сигналу системи з ПІ-регулятором

вих збурень, вплив нерівності поверхні руху проявляється як випадкова похибка, спектр якої зосереджений у смузі частот, яка приблизно вдвічі вужча за смугу частот вхідного випадкового збурення, та відрізняється тільки значеннями (зростають відповідно до підвищення рівня нерівностей).

Як видно з наведених в табл. 2 результатів, для базової структури системи стабілізації ефективність стабілізації обладнання стрімко знижується з погіршенням профілю доріг, така система є більш чутливою до комплексних випадкових збурень. Так, вже для збурення, обумовленого рухом МР місцевістю з профілем класу дороги D та з додатковими імпульсними збуреннями, система з базовою структурою не забезпечує допустимого значення кута відхилення місця встанов-

лення обладнання (кут відхилення 0,0536 град. при допустимому значенні 0,02 град.). Введення в систему ПІ-регулятора забезпечує прийнятне максимальне значення похибки стабілізації для усіх розглянутих умов руху МР, така система є менш чутливою до додаткових імпульсних збурень, які можуть бути зумовлені наявністю різких впадин чи пагорбів на розглянутих профілях класів доріг.

Висновки. Розвиток та подальше впровадження багатоцільових мобільних роботів нерозривно пов'язані з розвитком та інтеграцією різних технологічних областей робототехніки для забезпечення пересування, автономної орієнтації та навігації, розширення можливостей сприйняття та інтелектуального керування рухом, підвищення

ефективності засобів зв'язку та систем візуалізації руху. Серед багатьох завдань, які стоять перед розробниками МР, актуальними є завдання підвищення ефективності використання спеціального встановленого на МР обладнання, яке потребує стабілізації місця встановлення при русі МР місцевістю зі складним профілем поверхні та нерівностями.

Для дослідження ефективності системи стабілізації обладнання МР у пакеті Matlab Simulink розроблено схему та проведено моделювання реакції системи на випадкові збурення, обумовлені нерівностями поверхні руху об'єкта відповідно до класифікації доріг за рівнем нерівностей за стандартом ISO 8608. Проаналізовано часові

реалізації та спектральні щільності потужності реакції системи стабілізації, яка при нульовому вхідному сигналі є випадковою похибкою системи стабілізації. Встановлено, що система стабілізації з ПІ-регулятором забезпечує прийнятне значення випадкової похибки системи (не перевищуватиме 0,02 град.) для розглянутих класів доріг з нерівностями та додатковими імпульсними збуреннями.

У подальших дослідженнях необхідно оцінити вплив на точність стабілізації руху в'язкими поверхнями та параметричних збурень.

Отримані результати будуть використані для розробки адаптивної цифрової системи стабілізації обладнання, встановленого на малорозмірних МР багатоцільового призначення.

Список літератури:

1. F.Rubio, F.Valero, C. Liopis-Albert. A review of mobile robots: Concepts, methods, theoretical framework, and applications. *International Journal of Advanced Robotic Systems*. 2019. № 2. P. 1-22. DOI: <https://doi.org/10.1177/1729881419839596>
2. Осовцев А.В. Класифікація багатоцільових мобільних роботів. *XVI Всеукраїнська науково-практична конференція студентів, аспірантів та молодих вчених «Погляд у майбутнє приладобудування»: збірник праць*, Київ, 2023. С. 29-32.
3. Герасін О.С. Аналіз особливостей мобільних роботів багатоцільового призначення. *Наукові праці. Комп'ютерні технології*. 2014. № 238. С. 25-31.
4. Brunete A, Ranganath A, Segovia S, et al. Current trends in reconfigurable modular robots design. *Int J Adv Robot Syst*. 2017. 14(3). P. 1–21. DOI: 10.1177/1729881417710457
5. Бурау Н. І., Вознюк А.І., Цисарж В.В. Система стабілізації та наведення для наземних рухомих об'єктів на базі АНRS. *Техніка в сільськогосподарському виробництві, галузеве машинобудування, автоматизація*. 2016. № 29. С. 155-161.
6. Бурау Н.І., Вознюк А.І., Цисарж В.В. Аналіз напрямків удосконалення систем стабілізації та наведення обладнання на рухомих об'єктах. *Вісник Інженерної академії України*. 2015. № 3. С. 73-77.
7. M. Hoy. Algorithms for collision-free navigation of mobile robots in complex cluttered environments: a survey. *Robotica (2015)*. 2015. Volume 33. P. 463–497. DOI: 10.1017/S0263574714000289.
8. Sushchenko O.A., Salyuk A.A., Yehorov S.H. Features of modelling digital system of ground vehicle equipment. *Electronics and Control Systems*. 2020. № 3(65). P. 62-71. DOI: 10.18372/1990-5548.65.14989
9. Кузавков В.В., Зарубенко А.О. Варіант структури автоматичної стабілізації платформи антенного поля рухомого. *Сучасні інформаційні технології у сфері безпеки та оборони*. 2020. № 3(39). С. 23-32. DOI: 10.33099/2311-7249/2020-39-3-23-32
10. Сущенко О.А. Структурно-параметричний синтез дискретної робастної системи стабілізації інформаційно-вимірювальних пристроїв на рухомій основі. *Конструювання, виробництво та експлуатація сільськогосподарських машин*. 2016. Вип. 46. С. 194-201.
11. Александров Є.С., Ванін В.А., Александрова Т.Є., Ванін Б.В. Параметричний синтез стабілізатора рухомого об'єкту. *Вісник національного технічного університету «ХПІ». Серія: Математичне моделювання в техніці та технологіях*. 2021. №1-2 (2). С. 10-19. DOI: 10.20998/2222-0631.2021.02.02
12. Кравець П.І., Шимкович В.М., Федорчук В.В., Гой А.А. Нейромережевий контролер системи стабілізації рухомого об'єкта з апаратно-програмною реалізацією на ПЛІС. *Вісник НТУУ «КПІ» Інформатика, управління та обчислювальна техніка*. 2015. № 63. С. 4-11.
13. Кузнецов Б.І., Василець Т.Ю., Варфоломій О.О. Нейромережева система наведення і стабілізації з регулятором на основі еталонної моделі model reference controller. *Електротехніка та електромеханіка*. 2015. № 4. С. 35-39.
14. Вознюк А.І. Аналіз параметрів системи непрямої стабілізації рухомих об'єктів під час руху пересіченою місцевістю. *Вісник НТУУ «КПІ». Серія приладобудування*. 2017. Вип. 54(2). С. 20-26.
15. Бурау Н.І., Вознюк А.І., Осовцев А.В., Шаблій А.С. Аналіз впливу нерівностей місцевості на ефективність стабілізації обладнання рухомого об'єкта. *Вісник інженерної академії України*. 2017. № 2. С. 220-225.
16. Богомолів В.О., Клименко В.І., Шилов А.І., Алексєєв Р.В. Моделювання дорожньої поверхні для розрахунку динаміки руху транспортних засобів. *Автомобільний транспорт*. 2011. Вип. 29. С. 37-42.

**Bourao N.I., Osovtssev A.V. ANALYSIS OF THE EFFICIENCY OF THE EQUIPMENT
STABILIZATION OF A MOBILE MINI-ROBOT ON GROUND WITH A COMPLEX PROFILE**

The article is devoted to the development of a system of equipment stabilization and guidance (digital cameras, radars, antennas, laser rangefinders, optical-electronic modules for various purposes), installed on small-sized ground mobile robots of the wheel type. Such objects have problems in overcoming obstacles during movement on terrain with a complex profile, on off-road, sandy and viscous surfaces, so stabilization systems must ensure the effective use of the installed equipment in a wide range of movement speeds, conditions and terrain profile.

The work simulates the disturbances that affect the installed equipment when the mobile robot moves through terrain with a complex unevenness profile. Random perturbations for different classes of roads, and with additional impulse perturbations are generated. For the study, a simulation scheme of the stabilization system was developed in the Matlab Simulink package. A study of the system built according to the basic scheme and with the introduced PI-controller was carried out. Time realizations of the reaction of the stabilization system to generated random disturbances were obtained, their spectral power densities, root mean square deviations of the values of the initial value were determined, and the maximum value of the deviation angle of the place of the equipment installation from the horizon plane was determined, as the maximum error of stabilization. A comparative analysis of the maximum stabilization error obtained for different traffic terrain profiles and for different stabilization system construction schemes was carried out. It was established that the system with a PI-controller provides an acceptable value of the stabilization error for all considered types of disturbances. The obtained results will be used to develop an adaptive digital stabilization system for equipment installed on mobile robots.

Key words: mobile robots, stabilization system, simulation, irregularities, random disturbances, stabilization error.

Вакалюк Т.А.

Державний університет «Житомирська політехніка»

Янчук В.М.

Державний університет «Житомирська політехніка»

Морозов Д.С.

Державний університет «Житомирська політехніка»

Зубрицький В.В.

Державний університет «Житомирська політехніка»

Новіцька І.В.

Житомирський державний університет імені Івана Франка

ПРОГНОЗНЕ МОДЕЛЮВАННЯ АНАЛІТИКИ УСПІШНОСТІ СТУДЕНТІВ З ВИКОРИСТАННЯМ АЛГОРИТМІВ МАШИННОГО НАВЧАННЯ

Прогнозна аналітика стосується використання алгоритмів машинного навчання та статистики для прогнозування майбутніх результатів і продуктивності. Такі методи, як інтелектуальний аналіз даних і прогнозне моделювання, оцінюють ймовірність майбутніх результатів і сповіщають про майбутні події, щоб допомогти у прийнятті рішення. Використання машинного навчання (ML) для прогнозування успішності навчання студентів має потенціал для вдосконалення освітніх систем. Застосування ML у цій галузі відкриває нові можливості для аналізу великих обсягів даних, виявлення складних залежностей і розробки персоналізованих підходів до навчання. Сучасні системи управління навчанням та електронні платформи зберігають велику кількість інформації про навчальні досягнення студентів, такі як оцінки, відвідуваність, здані іспити тощо. Використання цих даних у поєднанні з ML дозволяє ідентифікувати корисні закономірності та прогнозувати майбутні успіхи студентів. В даній роботі було визначено проблему прогнозного моделювання та аналітики успішності студентів з використанням алгоритмів машинного навчання. Дослідження і аналіз алгоритмів машинного навчання для прогнозного моделювання та аналітики успішності студентів є важливим кроком у покращенні освітнього процесу. Відштовхуючись від цього, було проведено дослідження та проаналізовано декілька алгоритмів машинного навчання. Було проведено аналіз метрик та результатів натренованої моделі. З матриці помилок можна побачити, що отримано досить непогані результати після підбору параметрів для моделей. У результаті було отримано реалізацію алгоритму прогнозного аналізу з використанням моделей RandomForest та XGBoost, який підходить для подальшої модернізації та практичному застосуванні. З освітньої точки зору, це дослідження може допомогти викладачам визначити студентів, які перебувають у групі ризику щодо поганої успішності, і може допомогти педагогам вжити своєчасних коригувальних заходів.

Ключові слова: прогнозне моделювання, аналітика, успішність студентів, машинне навчання, алгоритми.

Постановка проблеми. Прогнозна аналітика стосується використання алгоритмів машинного навчання та статистики для прогнозування майбутніх результатів і продуктивності. Такі методи, як інтелектуальний аналіз даних і прогнозне моделювання, оцінюють ймовірність майбутніх результатів і сповіщають про майбутні події, щоб допомогти у прийнятті рішення.

Прогнозна аналітика допомагає передбачити майбутні тенденції та закономірності, викорис-

товуючи історичні дані. Вона використовує різні шаблони даних і визначає кореляції між змінними. Це допомагає зменшити бізнес-ризик та витрати, прогнозуючи майбутні значення певних змінних. Використання машинного навчання (ML) для прогнозування успішності навчання студентів має потенціал для вдосконалення освітніх систем. Застосування ML у цій галузі відкриває нові можливості для аналізу великих обсягів даних, вияв-

лення складних залежностей і розробки персоналізованих підходів до навчання. Сучасні системи управління навчанням та електронні платформи зберігають велику кількість інформації про навчальні досягнення студентів, такі як оцінки, відвідуваність, здані іспити тощо. Використання цих даних у поєднанні з ML дозволяє нам ідентифікувати корисні закономірності та прогнозувати майбутні успіхи студентів.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Сьогодні аналіз даних перебуває в центрі уваги всіх галузей [6], [7], [8], [9], [10], [11], [12]. Якщо підприємство не використовує аналіз накопичених даних, тоді можна говорити про обраний хибний та некомпетентний підхід у веденні бізнесу на відміну від конкурентів, які займаються даним процесом. Аналіз даних дає змогу підприємству вживати активних заходів і створювати конкурентні переваги у своїй галузі.

Систематичне застосування статистичних і логічних методів для опису обсягу даних, модульності структури даних, стиснення представлення даних, ілюстрації за допомогою зображень, таблиць і графіків, а також оцінки статистичних нахилів, даних про ймовірність і отримання значущих висновків, відомі як аналіз даних. Найбільш зацікавлені у використанні методів та інструментів аналізу даних є комерційні підприємства, що розгортають свої проекти на основі інформаційних сховищ даних [3]. Забезпечення цілісності даних є одним із найважливіших компонентів аналізу даних. Розглянемо деякі методи інтелектуального аналізу даних.

Регресійний аналіз – метод, який працює шляхом моделювання зв'язку між залежною змінною та однією або кількома незалежними змінними. Модель регресії може бути лінійною, множинною, логістичною, нелінійною, життєвими даними тощо [10]. Часто особливий інтерес приділяється оцінці впливу кожної незалежної змінної на залежну змінну, і такий ефект розглядається як середнє значення ефекту для всіх суб'єктів у вибірці. Наприклад, якщо бали з математики 500 студентів регресують за показником їхньої мотивації, значення нахилу або коефіцієнт регресії кількісно визначає середню зміну досягнень з математики для всіх 500 студентів на одну одиницю зміни мотивації. Це означає, що ці 500 студентів розглядаються як одна однорідна група щодо впливу мотивації на досягнення з математики, а неявне припущення полягає в тому, що ці студенти є з однієї групи населення зі схожими характеристиками.

Інтерес до вивчення аналітики навчання, пов'язаної із залученням студентів, останнім часом значно зростає. Це ще більше розширило дослідницьке поле для освіти. Заклади вищої освіти виявили свою зацікавленість у використанні аналітики для підтримки їхньої участі. Це може діяти як інструмент, який допоможе в посередництві обміну інформацією між студентами та викладачами, що призведе до ефективного навчання, підвищення обізнаності та способу вирішення поточних складних ситуацій.

Експериментальне дослідження – це, по суті, дослідження однієї або кількох змінних (залежних змінних), якими маніпулюють для оцінки впливу на одну або більше змінних, відомих як незалежні змінні. Воно базується на причинно-наслідкових зв'язках у вибраному предметі, щоб зробити висновок про різні зв'язки, які може створити продукт, теорія чи ідея [9]. Відношення серед змінних встановлюється за допомогою точної та систематичної маніпуляції. Ця методика підходить, коли в основі дослідження лежить теорія тестування та оцінка методів. Крім того, ту саму настройку та протокол можна відтворити за допомогою тих самих змінних. Це може підтвердити достовірність продуктів, ідей і теорій [6]. Крім того, цей тип наукового підходу може надати набір інструкцій для оцінювання та звітування інформації для дослідження.

Метою роботи є аналіз моделей, методів прогнозного аналізу для аналітики успішності студентів.

Виклад основного матеріалу. Машинне навчання має власний життєвий цикл, тобто процес, який проходять дані для розробки та розгортання системи прогнозування. Порівняно з життєвим циклом розробки програмного забезпечення, розробка моделей машинного навчання передбачає експериментування з наборами даних для досягнення цілей і завдань, визначених під час застосування свіжих даних після навчання. Розглянемо кожен з етапів більш детально.

1. **Збір даних.** Як відомо, машини спочатку навчаються на даних, які їм надаються. Надзвичайно важливо збирати надійні дані, щоб модель машинного навчання могла знайти правильні шаблони. Якість даних, які подаються на машину, визначатиме, наскільки точна запропонована модель. Якщо є неправильні або застарілі дані, в результаті отримаємо неправильні результати або прогнози, які не є актуальними. Тому потрібно переконатись, що дані використовуються з надійного джерела, оскільки це безпосередньо вплине на результат моделі. Хороші дані є релевантними,

містять дуже мало пропущених і повторюваних значень і добре представляють різні наявні підкатегорії/класи.

2. Попередня обробка даних. Отримавши дані, їх потрібно підготувати. Це можна зробити за допомогою:

а. Об'єднання всіх наявних даних і їх рандомізація. Це допомагає переконатися, що дані розподіляються рівномірно, а порядок не впливає на процес навчання.

б. Очищення даних для видалення непотрібних даних, відсутніх значень, рядків і стовпців, повторюваних значень, перетворення типів даних тощо. Можливо, навіть доведеться реструктурувати набір даних і змінити рядки та стовпці або індекси рядків і стовпців.

в. Візуалізуйте дані, щоб зрозуміти, як вони структуровані, і зрозуміти взаємозв'язок між різними змінними та присутніми класами.

г. Розбиття очищених даних на два набори – набір для навчання та набір для тестування. Навчальний набір – це набір, з якого вчиться модель. Тестовий набір використовується для перевірки точності моделі після навчання.

3. Вибір моделі машинного навчання. Модель машинного навчання визначає результати, які отримуються після запуску алгоритму машинного навчання на зібраних даних. Важливо підібрати модель, яка відповідає поставленим завданням. Протягом багатьох років вчені та інженери розробляли різні моделі, які підходять для різних завдань, таких як розпізнавання мовлення, розпізнавання зображень, прогнозування тощо. Окрім цього, також потрібно перевірити, чи підходить модель для числових чи категоріальних даних, і вибрати відповідно.

4. Навчання моделі є найважливішим кроком у машинному навчанні. Під час навчання передаються підготовлені дані моделі машинного навчання, щоб знаходити закономірності та робити прогнози. Це призводить до того, що модель навчається на даних, щоб вона могла виконати поставлене завдання. З часом, під час навчання, модель стає краще прогнозувати.

5. Покращення параметрів моделі. Після того, як створено та оцінено модель, важливо подивитись, чи можна якимось чином підвищити її точність. Це робиться шляхом налаштування параметрів, наявних у моделі. Параметри – це змінні в моделі, які зазвичай вибирає програміст. При конкретному значенні параметра точність буде максимальною. Налаштування параметрів стосується пошуку цих значень.

6. Використання попередньо натренованої моделі на абсолютно нових даних.

Оцінка прогнозової моделі є важливою частиною для визначення точності успішності студента. Для цього важливо кількісно оцінити якість прогнозів системи [3]. Розглянемо деякі важливі показники ефективності для оцінки методів машинного навчання:

1. Точність – це кількість правильних позитивних результатів, поділена на всі зразки, позначені алгоритмом як позитивні.

2. Правильність – визначається як відношення правильних прогнозів до загальної кількості введених зразків. Це часто використовується метрика для оцінки якості рішень класифікатора. Це найбільш використовується метрика оцінки як для бінарної, так і для багатокласової класифікації. Це визначальне значення для оцінки можливостей алгоритму.

3. Чутливість – це кількість правильних позитивних результатів, поділена на всі зразки, які алгоритм повинен був позначити як позитивні.

На відміну від будь-яких інших показників, прогнозна аналітика навчання є більш ефективною, оскільки зосереджена на окремому студенті, а не на системі керування навчанням в цілому. Це робить прогнозу аналітику надзвичайно впливовою у вирішенні проблем, які спричиняють неефективне навчання. Це дозволяє керівникам визначати прогрес, досягнутий співробітниками на своїх курсах. Ця технологія допомагає зрозуміти, наскільки добре студенти отримали вигоду від курсів і чи збираються вони застосовувати отримані знання на практиці.

Ефективність рішення машинного навчання залежить від природи набору даних і продуктивності алгоритмів. Вибір правильного алгоритму навчання, який підходить для застосування в конкретній області, є не простою справою. Причина цього полягає в тому, що призначення алгоритмів ML є різними. Навіть результати різних алгоритмів навчання в подібній категорії можуть відрізнятися залежно від характеристик даних [7]. Багато алгоритмів машинного навчання було реалізовано в дослідницькому співтоваристві. Розглянемо найважливіші і відомі методи, які фігурують у науковій літературі.

Логістична регресія [1] (або логіт-регресія) – це оцінка параметрів логістичної моделі (коефіцієнтів у лінійній комбінації). Формально в бінарній логістичній регресії існує одна двійкова залежна змінна, кодована змінною-індикатором, де два значення позначені «0» і «1», тоді як кожна з незалежних змінних може бути двійковою змінною (два

класи, кодовані як індикаторна змінна) або безперервна змінна (будь-яке реальне значення). Відповідна ймовірність значення, позначеного як «1», може коливатися від 0 (звичайно, значення «0») до 1 (безумовно, значення «1»), отже, позначення; [2] функція, яка перетворює логарифмічні шанси на ймовірність, є логістична функція, звідси і назва. Одиниця вимірювання для логарифмічної шкали шансів називається логіт, від *logistic unit*, звідси альтернативні назви. Формула логістичної регресії, як незалежні змінні впливають на залежну змінну [2]:

$$F1 = 2 * (precision * recall) / (precision + recall),$$

де P – у логістичній моделі $p(x)$ інтерпретується як ймовірність того, що залежна змінна Y дорівнює успіху або підпадає під класифікацію випадку, або не підпадає під класифікацію випадку. Це важливо, оскільки воно показує, що значення виразу лінійної регресії може змінюватися від негативної до позитивної нескінченності, і все ж після перетворення результуючий вираз для ймовірності $P(X)$ коливається між 0 і 1;

$\beta_1, \beta_2, \dots, \beta_n$ є невідомими параметрами (коефіцієнтами);

β_0 є константою для створення лінії найкращого підходу. Метою логістичної регресії є зіставлення функції з характеристик набору даних на цілі для обчислення ймовірності того, що новий запис належить до одного з цільових класів.

Дерево рішень має деревоподібну структуру, де кожен вузол показує атрибут, кожне посилення показує рішення (правило), а кожен лист показує результат. Його можна використовувати як для безперервних, так і для дискретних наборів даних [9]. Дерево рішень починається з кореневого вузла. З цього вузла користувачі рекурсивно розділяють кожен вузол відповідно до алгоритму навчання дерева рішень на основі запитань «якщо». Результатом є дерево рішень, у якому кожна гілка представляє можливий сценарій рішення та його результат.

Випадковий ліс (RandomForest) – вважається експертним рішенням для більшості проблем і підпадає під класифікатори ансамблевого навчання, за допомогою яких слабкі моделі поєднуються для

створення потужної. Ансамблеві методи є одними з найбільш перспективних напрямів дослідження. Він визначається як набір класифікаторів, прогнози яких об'єднуються для прогнозування нових випадків. Ансамблеві алгоритми навчання показали себе як ефективний метод для підвищення точності прогнозування та послаблення складності проблем навчання у підпроблеми. Численні дерева рішень створюються у випадкових лісах. Щоб класифікувати об'єкт, що має атрибути, кожне з дерев дає класифікацію, яка також вважається голосом. Тоді лісу надається можливість вибрати класифікацію з максимальною кількістю голосів. Це показано на рис. 1.

Збільшення градієнта – це техніка машинного навчання, яка використовується, зокрема, у завданнях регресії та класифікації. Вона дає модель прогнозування у формі ансамблю слабких моделей прогнозування, які зазвичай є деревами рішень. Коли дерево рішень є слабким навчальним елементом, отриманий алгоритм називається деревом із посиленням градієнта; зазвичай він перевершує випадковий ліс.

XGBoost є скороченням від «Extreme Gradient Boosting». «Екстремальний» стосується підвищення швидкості, наприклад паралельних обчислень і усвідомлення кешу, що робить XGBoost приблизно в 10 разів швидшим, ніж традиційний Gradient Boosting. Крім того, XGBoost включає унікальний алгоритм пошуку поділу для оптимізації дерев разом із вбудованою регуляризацією, яка зменшує

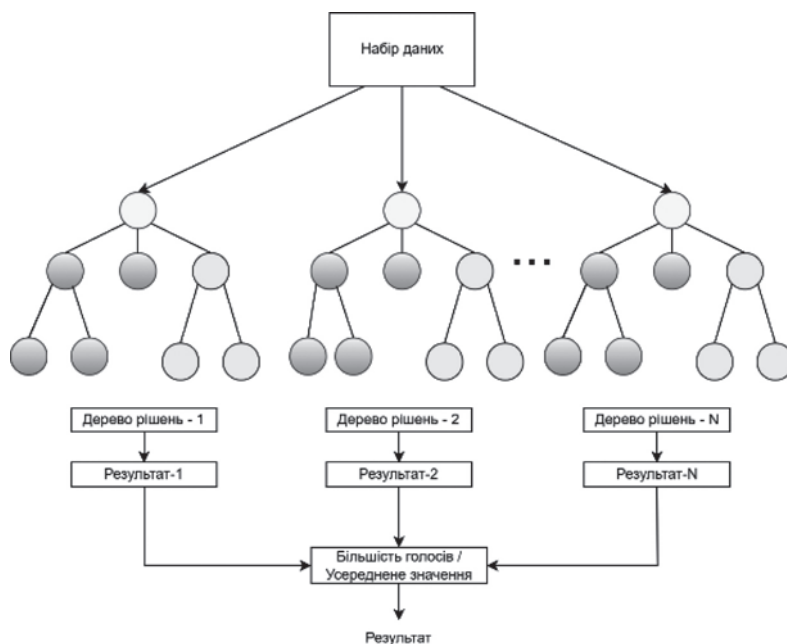


Рис. 1. Приклад випадкового лісу з урахуванням кількох результатів дерева рішень

переобладнання. Загалом, XGBoost – це швидша та точніша версія Gradient Boosting. XGBoost тренується на залишках. Замість агрегування дерев, підсилені градієнтом дерева навчаються на помилках під час кожного раунду посилення.

Для прогнозової аналітики додатку слід використати прогнозне моделювання за допомогою мови програмування Python [5], [12].

Написання коду відбуватиметься в хмарному середовищі розробки Google Colaboratory.

Важливо знати, як правильно орієнтуватися в даних, з якими працюєте, щоб знати, як побудувати прогнозу модель. З цієї причини Python має кілька функцій, які допоможуть у дослідженнях:

- `info()` – Функція, що показує нам тип даних кожного стовпця, кількість стовпців, використання пам'яті та кількість записів у наборі даних;
- `shape` – властивість, що відображає кількість записів і стовпців;
- `describe()` – функція, що узагальнює статистичні властивості набору даних, такі як кількість, середнє, мінімальне та максимальне;
- `corr()` – функція, що відображає кореляцію між різними змінними в нашому наборі даних. Чим ближче до 1, тим сильніша кореляція між цими змінними. Знак мінус означає, що ці 2 змінні негативно корельовані, тобто одна зменшується зі збільшенням іншої і навпаки.

Побудова алгоритму машинного навчання

Почнемо з попередньої обробки даних. На цьому етапі потрібно:

1. Переглянути кількість значень для кожного атрибуту в певному наборі даних (рис. 2).
2. Перетворення категоріальних змінних на фіктивні/індикаторні змінні, тому що описані вище моделі працюють на основі математичних моделей, яким потрібні числові значення.

```
Data Pre-Processing
[ ] for column in raw_data:
    unique_values = np.unique(raw_data[column])
    number_of_values = len(unique_values)
    if number_of_values <= 10:
        print("The number of values for feature {} is: {}".format(column, number_of_values, unique_values))
    else:
        print("The number of values for feature {} is: {}".format(column, number_of_values))

The number of values for feature Rating is: 460
The number of values for feature Geography is: 3 -- ['France' 'Germany' 'Spain']
The number of values for feature Gender is: 2 -- ['female' 'male']
The number of values for feature Age is: 78
The number of values for feature Discussion is: 11
The number of values for feature CurrentValue is: 6382
The number of values for feature AnnouncementsView is: 4 -- [1 2 3 4]
The number of values for feature HasOtherActiveCourse is: 2 -- [0 1]
The number of values for feature IsActiveMember is: 2 -- [0 1]
The number of values for feature EstimatedValue is: 9999
The number of values for feature Target is: 2 -- [0 1]
```

Рис. 2. Огляд властивостей дата сету

3. Масштабування числових властивостей за допомогою `MinMaxScaler` для підвищення швидкості роботи моделей та їх точності (рис. 3). Дві найпопулярніші техніки для масштабування числових даних перед моделюванням – нормалізація та стандартизація. Нормалізація масштабує кожну

вхідну змінну окремо до діапазону 0–1, який є діапазоном для значень з плаваючою комою, де ми маємо найбільшу точність. Стандартизація масштабує кожну вхідну змінну окремо шляхом віднімання середнього (це називається центруванням) і ділення на стандартне відхилення, щоб зсунути розподіл, щоб отримати середнє значення нуль і стандартне відхилення одиниці.

Наступний етап це розбиття даних за допомогою методики «утримування» – це коли ви діляете свій набір даних на набір «навчальний» і «тестовий». Навчальний набір – це те, на чому модель навчається, а тестовий набір використовується, щоб побачити, наскільки добре ця модель працює на нових даних. Звичайним поділом під час використання методу очікування є використання 90% даних для навчання, а решта 10% даних для тестування (рис. 4).

Після цього отриманні дані можна використовувати в моделях, на наступному рисунку зображено побудову дерева рішень (рис. 5), яке, в свою чергу, можна використати для знаходження найбільш релевантних властивостей набору даних. Наприклад, якщо стоїть мета покращити результативність лінійної регресії чи отримати показники властивостей, які найбільше впливають на кінцевий результат, `DecisionTreeClassifier` має повністю справитися з цією задачею.

```
scale_variables = raw_data.select_dtypes(include='number').columns
print(scale_variables)

scaler = MinMaxScaler()
new_raw_data[scale_variables] = scaler.fit_transform(new_raw_data[scale_variables])

Index(['Rating', 'Age', 'Discussion', 'CurrentValue', 'AnnouncementsView',
       'HasOtherActiveCourse', 'IsActiveMember', 'EstimatedValue', 'Target'],
      dtype='object')
```

Рис. 3. Масштабування числових даних

```
Splitting the Historical Data - Hold-out validation

X = new_raw_data.drop('target', axis='columns').values
y = new_raw_data['target'].values
print("X shape: {}".format(np.shape(X)))
print("y shape: {}".format(np.shape(y)))

X_train, X_test, y_train, y_test = train_test_split(X, y, train_size=0.9, test_size=0.1, random_state=0)

X shape: (649, 56)
y shape: (649,)
```

Рис. 4. Розбиття даних

Дерево рішень отримує знання у формі дерева, яке також можна переписати як набір окремих правил, щоб полегшити його розуміння. Основною перевагою класифікатора дерева рішень є його здатність використовувати різні підмножини ознак і правила прийняття рішень на різних етапах класифікації. Загальне дерево рішень складається з одного кореневого вузла, ряду внутрішніх і кінцевих вузлів і гілок. Листові вузли вказують на клас, який буде присвоєно зразку. Кожен внутрішній вузол дерева відповідає ознаці, а гілки представляють об'єднання ознак, які призводять до цих класифікацій. Кожна властивість має зна-

чення важливості, яке відмінне від нуля, тому нічого не потрібно видаляти з набору даних.

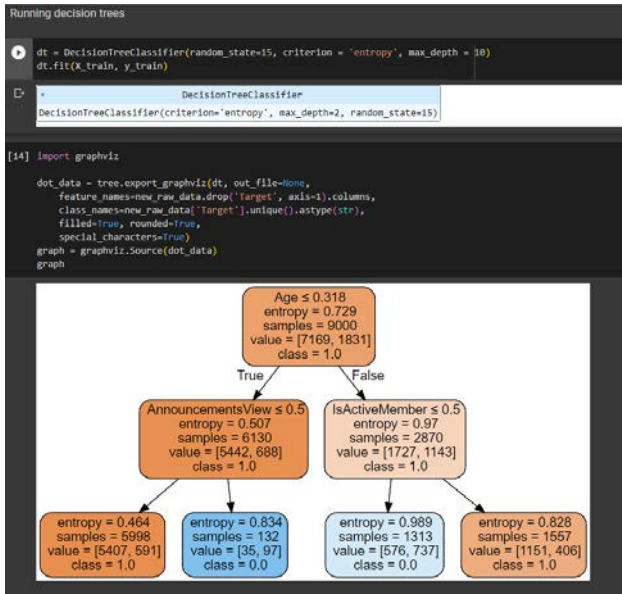


Рис. 5. Побудова дерева рішень

Розглянемо використання моделі RandomForest та покращення її результатів шляхом підбору параметрів для роботи з набором даних (рис. 6), також побудуємо матрицю помилок [7]. З отриманої матриці (1 – успішне завершення курсу, 0 – студент не зміг завершити курс успішно) можна встановити, що ми отримали досить непогані результати класифікації, адже коефіцієнт правильного встановлення того що студент не завершить курс 0.96, а коефіцієнт правильності встановлення успішного завершення становить 0.47.

Наступний етап полягає в виборі найкращих параметрів моделі при використанні з навчальним набором даних, лише після цього можемо добитися більш кращого результату виконання прогнозного аналізу на абсолютно новому наборі даних (рис. 7, рис. 8). Наступний крок, це використання моделі на абсолютно новому наборі даних, для визначення того чи завершить студент курс та з якою імовірністю.



Рис. 6. Використання моделі RandomForest на розбитих даних за допомогою методики утримування

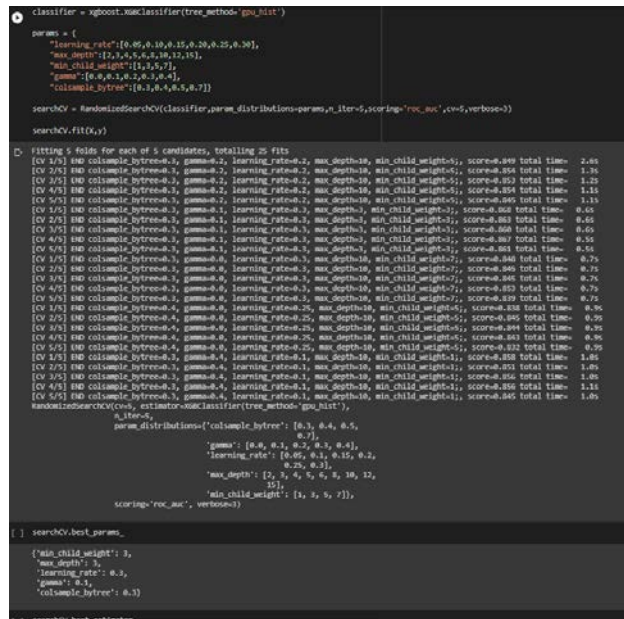


Рис. 7. Підбір параметрів моделі XGBoost

Аналіз результатів та визначення метрик для оцінки моделей

Точність моделі є основним індикативним фактором для оцінки моделі. Результати, отримані за алгоритмом, були представлені відповідно до найвищої спостережуваної точності.

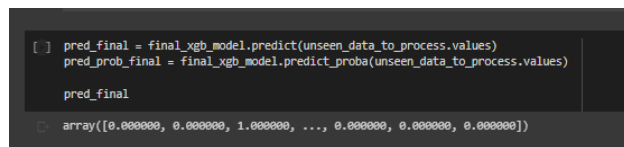


Рис. 8. Попередня обробка нових даних та використання фінальної моделі з обраними параметрами для прогнозування

Для оцінки моделі були використані такі характеристики:

- Точність (Accuracy) є найосновнішим показником продуктивності, який відображає загальну правильність передбачень моделі. Він обчислюється шляхом ділення кількості правильно передбачених випадків на загальну кількість випадків. Однак точність може ввести в оману, якщо набір даних незбалансований, тобто один клас має значно більше екземплярів, ніж інші.
- Презиція (Precision) – вимірює частку правильно передбачених позитивних випадків серед усіх випадків, передбачених як позитивні. Він акцентує увагу на правильності позитивних прогнозів. Точність обчислюється шляхом ділення кількості істинних позитивних результатів (правильно передбачених позитивних випадків) на суму істинних позитивних і хибних позитивних

результатів (неправильно передбачених позитивних випадків).

- Запам'ятовування (Recall) – також відоме як чутливість (Sensitivity) або справжній позитивний показник, вимірює частку правильно передбачених позитивних випадків серед усіх фактичних позитивних випадків. Він зосереджується на здатності моделі визначати позитивні випадки. Відкликання обчислюється діленням кількості істинно позитивних результатів на суму істинно позитивних результатів і хибно-негативних результатів (позитивні випадки, неправильно передбачені як негативні).

- Помилка класифікації – також відома як помилка неправильної класифікації або частота помилок, є показником, який використовується для оцінки ефективності моделі класифікації. Він кількісно визначає ступінь, до якого модель неправильно класифікує спостереження або робить неправильні прогнози. У контексті машинного навчання помилка класифікації є важливим показником для оцінки точності та надійності класифікатора.

- F-measure (F1) – це збалансована метрика, яка поєднує точність і запам'ятовування в один єдиний показник. Він забезпечує гармонійне середнє значення точності та запам'ятовування, надаючи однакову важливість обома показникам. F1-оцінка широко використовується, коли існує нерівномірний розподіл класів у наборі даних. Він розраховується як середньозважене значення точності та запам'ятовування за формулою:

Наступним кроком для більш кращого розуміння роботи нашої моделі є побудова матриці помилок, що дасть нам більш детальні характеристик того наскільки точним було наше прогнозування. Матриця помилок зазвичай використовується для оцінки ефективності методів, використаних після класифікації. Переглянемо матриці помилок після покращення параметрів моделей (1 – успішне завершення курсу, 0 – студент не зміг завершити курс успішно). Матриця плутанини, також відома як матриця помилок, – це таблиця, яка підсумовує продуктивність моделі класифікації. Це особливо корисно під час оцінювання моделей, які класифікують дані на два класи. Матриця плутанини дає уявлення про кількість істинно позитивних, істинно негативних, хибно-позитивних і хибно-негативних результатів, створених моделлю.

Ось розподіл компонентів у матриці плутанини для задачі бінарної класифікації з двома класами, які часто позначаються як «позитивний» і «негативний»:

- Істинно позитивні результати (TP – True Positives): це кількість випадків, які модель правильно класифікувала як позитивні.

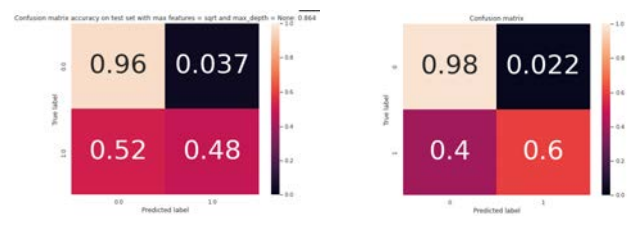
- Істинно негативні результати (TN – True Negatives): Це вказує на кількість екземплярів, які модель правильно класифікувала як негативні.

- Хибно-позитивні спрацьовування (False FP): також відомі як помилки типу I, це випадки, які модель неправильно класифікувала як позитивні, хоча насправді вони належать до негативного класу.

- Хибно-негативні (FN): також звані помилками типу II, це випадки, які були неправильно класифіковані як негативні моделлю, хоча вони насправді належать до позитивного класу.

Матриця помилок пропонує стислий підсумок результатів класифікації моделі, що дає нам змогу оцінити її ефективність і визначити потенційні області для вдосконалення.

Аналізуючи отримані метрики, можна зробити висновок, що XGBoost набагато краще справляється з проблемою прогнозування класифікації, але також не можна відкидати модель RandomForest для даної задачі, тому що вона також показує гарні результати.



а) б) **Рис. 9. Матриця помилок для а) RandomForest б) XGBoost після покращення параметрів**

Отримані дані, в свою чергу, викладачі можуть використовувати для роботи зі студентами опираючись на результати роботи моделі, наприклад після класифікаційної обробки було отримано відповідь на те, чи завершить студент курс та з якою ймовірністю це відбудеться (рис. 10).

Predictions - Succeed or Not	Predictions - Probability to Succeed education	Predictions - Succeed or Fail Desc.
1.0	0.56	Succeed
0.0	0.27	Fail
1.0	0.96	Succeed
0.0	0.02	Fail
0.0	0.10	Fail

Рис. 10. Результати прогнозного аналізу використовуючи модель з обраними попередньо параметрами

Висновки. В даній роботі було визначено проблему прогнозного моделювання та аналітики

успішності студентів з використанням алгоритмів машинного навчання. Дослідження і аналіз алгоритмів машинного навчання для прогнозного моделювання та аналітики успішності студентів є важливим кроком у покращенні освітнього процесу. Відштовхуючись від цього, було проведено дослідження та проаналізовано декілька алгоритмів машинного навчання.

Було проведено аналіз метрик та результатів натренованої моделі. З матриці помилок можна побачити, що отримано досить непогані результати після підбору параметрів для моде-

лей. В основному моделі показали досить гарні результати. Також проведено приклад використання отриманих даних.

У результаті було отримано реалізацію алгоритму прогнозного аналізу з використанням моделей RandomForest та XGBoost, який підходить для подальшої модернізації та практичному застосуванню. З освітньої точки зору, це дослідження може допомогти викладачам визначити студентів, які перебувають у групі ризику щодо поганої успішності, і може допомогти педагогам вжити своєчасних коригувальних заходів.

Список літератури:

1. Зубрицький В. В. Огляд методів та технологій штучного інтелекту в електронному навчанні. *Сучасні виклики і актуальні проблеми науки, освіти та виробництва: міжгалузеві диспути [зб. наук. пр.]: матеріали XXIV міжнародної науково-практичної інтернет-конференції* (м. Київ, 28 січня 2022 р.). Київ, 2022. С. 43-45.
2. Zubrytskyi Vasyl, Vakaliuk Tetiana. Overview of methods of intellectual data analysis. *Тези доповідей II Міжнародної студентської наукової конференції (Т. 2)*, м. Одеса, 17 грудня, 2021.
3. Chilukuri, K. C. A novel framework for active learning in engineering education mapped to course outcomes. *Procedia Computer Science*, 172, 2020. P. 28–33.
4. Dewan, M. A. A., Murshed, M., & Lin, F. Engagement detection in online learning: a review. *Smart Learning Environments*, 6(1), 2019.
5. Python Documentation. URL: <https://www.python.org/doc/>. (дата звернення: 10.08.2023)
6. Ko, C. Y., Leu, F.-Y. Examining successful attributes for undergraduate students by applying machine learning techniques. *IEEE Transactions on Education*, 64 (1), 2021. P. 50–57.
7. Krawczyk, B., Minku, L. L., Gama, J., Stefanowski, J., Woźniak, M. Ensemble learning for data stream analysis: A survey. *Information Fusion*, 37, 2017. P. 132–156
8. Liu, Z., Yang, C., Rüdian, S., Liu, S., Zhao, L., Wang, T. Temporal emotion-aspect modeling for discovering what students are concerned about in online course forums. *Interactive Learning Environments*, 27(5–6), 2019. P. 598–627. <https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/10494820.2019.1610449>
9. Liu, Z., Zhang, N., Peng, X., Liu, S., Yang, Z., Peng, J., Su, Z., & Chen, J. Exploring the relationship between social interaction, cognitive processing and learning achievements in a MOOC discussion forum. *Journal of Educational Computing Research*, 60(1), 2022. P. 132–169. <https://journals.sagepub.com/doi/10.1177/073563312111027300>
10. Moscoso-Zea, O., Paredes-Gualtor, J., Lujan-Mora, S. A holistic view of data warehousing in education. *IEEE Access*, 6, 2018. P. 64659–64673
11. Moscoso-Zea, O., Lujan-Mora, S. Knowledge management in higher education institutions for the generation of organizational knowledge. *In 2017 12th Iberian Conference on Information Systems and Technologies (CISTI)*. 2017.
12. Russell, R. Machine learning step-by-step guide to implement machine learning algorithms with Python. Editorial: Columbia, Sc. 2018.
13. Shahiri, A. M., Husain, W., Rashid, N. A. A review on predicting student's performance using data mining techniques. *Procedia Computer Science*, 72, 2015. P. 414–422.

Vakaliuk T.A., Yanchuk V.M., Morozov D.S., Zubrytskii V.V., Novitska I.V.

PREDICTIVE MODELING OF STUDENT PERFORMANCE ANALYTICS USING MACHINE LEARNING ALGORITHMS

The term “predictive analytics” describes the application of statistics and machine learning techniques to forecast future results and performance. In order to assist you in making decisions, techniques like data mining and predictive modeling calculate the likelihood of future outcomes and notify you of impending events. The ability to anticipate student performance using machine learning has the potential to enhance educational systems. The use of machine learning in this area opens up new opportunities for analyzing large amounts of data, identifying complex dependencies, and developing personalized learning approaches. Modern learning management systems and e-platforms store a large amount of information about students’

academic achievements, such as grades, attendance, exams, etc. Using this data in conjunction with machine learning allows us to identify useful patterns and predict future student performance. In this paper, we have identified the problem of predictive modeling and analytics of student performance using machine learning algorithms. Research and analysis of machine learning algorithms for predictive modeling and analytics of student performance is an important step in improving the educational process. Based on this, several machine learning algorithms have been researched and analyzed. The metrics and results of the trained model were analyzed. From the error bars, we can see that quite good results were obtained after selecting the parameters for the models. As a result, an implementation of the predictive analysis algorithm using the RandomForest and XGBoost models was obtained, which is suitable for further modernization and practical application. From an educational point of view, this study can help teachers identify students who are at risk of poor performance and can help educators take timely corrective measures.

Key words: *predictive modeling, analytics, student performance, machine learning, algorithms.*

Вдовичин Т.Я.

Дрогобицький державний педагогічний університет імені Івана Франка

Пазюк Р.І.

Дрогобицький державний педагогічний університет імені Івана Франка

ВИКОРИСТАННЯ ХМАРНИХ ТЕХНОЛОГІЙ ЯК ІНСТРУМЕНТУ ДЛЯ ОЦІНЮВАННЯ НАВЧАЛЬНИХ ДОСЯГНЕНЬ

Застосування хмарних технологій в освітньому процесі дозволяє формувати підготовленого фахівця, конкурентоспроможного на ринку праці. У діяльності навчальних закладів здійснюється постійний пошук форм, методів, прийомів використання хмарних технологій, що сприяють підвищенню ефективності освітнього процесу. Тому у статті продемонстровано застосування хмарних технологій для підвищення ефективності освітнього процесу, зокрема, активізації пізнавальної діяльності та мотивації до навчання, збільшення обсягу виконуваних робіт, удосконалення контролю знань, ефективності самостійної та пошукової роботи тощо. Хмарні технології можна використовувати для реалізації різних завдань, які постають перед освітнім процесом, бо відрізняються від інших сервісів універсальністю та мобільністю надання послуг. Зокрема, у статті розкрито, що чинниками для застосування хмарних технологій є доступ до мережі Інтернет; підтримка на різних технічних засобах, синхронізація даних у хмарному сховищі як між сервісами, так і між засобами навчання; персоналізоване хмарне освітнє середовище, що знімає обмеження щодо географічної віддаленості від навчального закладу, а також надає доступ до навчально-методичних матеріалів освітнього закладу.

У статті продемонстровано використання хмарних технологій для здійснення контролю знань, що дозволяє оптимізувати навчальний час і оперативно отримати результати рівня оволодіння тими чи іншими вміннями. Акцентовано увагу авторами статті на цифрові інструменти Google, зокрема, Форма, що дозволяє випробувати можливості хмарних обчислень у освітньому процесі для організації перевірки навчальних досягнень. Форма має потужний функціонал та конструктор для формування бази запитань, налаштування відповідей та перегляд результатів опитування респондентів у вигляді підсумкових таблиць та візуалізації даних, інтегрована з іншими додатками Google та користується популярністю серед користувачів через простоту роботи та зрозумілий інтерфейс.

Ключові слова: хмара, хмарні технології, освітній процес, контроль знань.

Постановка проблеми. Хмарні технології пропонують масштабовану інфраструктуру і програмні засоби без конкретного зв'язку з технічним засобом. Вони дають можливість різноманітним серверам об'єднатися єдиним обчислювальним середовищем. Для забезпечення функціонування хмарних сервісів потрібно доступ до глобальної мережі. Хмара – це деякий центр опрацювання даних (дата-центр, сервер) або їхня мережа, де зберігаються дані та програми, що з'єднуються з користувачами через Інтернет [1]. «Термін «хмара» використовується, виходячи із подібності зображення Інтернету або складної інфраструктури (рис. 1).

Суть хмарних технологій полягає в адаптації даних, якими оперує користувач з певних технічних засобів на сервери глобальної мережі. Фахівці комп'ютерного моделювання можуть це трактувати як розгортання програмних комплексів на інтернет-ресурсах. Для конкретного користувача

хмарний сервіс надає можливість орендувати як його програмне забезпечення, так і потужності сервера. У хмарі зберігаються не лише дані, а й додатки, які використовує певний користувач з мінімальними функціональними вимогами до програмного забезпечення. Тобто питання щодо налаштування, обслуговування та оновлення програмного забезпечення покладається на власника хмарного сервісу – провайдера. В результаті можна узагальнити обов'язкові характеристики хмарних сервісів, які подані на рис. 2.

З точки зору постачальника хмарних послуг, то вони характеризуються зручністю та універсальністю доступу



Рис. 1. Хмара як ЦОД з різних пристроїв

Самообслуговування на вимогу	Універсальний доступ по мережі	Об'єднання ресурсів	Еластичність послуги	Облік споживання
<ul style="list-style-type: none"> споживач самостійно визначає і змінює обчислювальні потреби, такі як серверний час, швидкість доступу і обробки даних, об'єм даних, що зберігаються, без взаємодії з представником постачальника послуг 	<ul style="list-style-type: none"> послуги доступні споживачам по мережі передачі даних незалежно від використуваного термінального пристрою 	<ul style="list-style-type: none"> постачальник послуг об'єднує ресурси для обслуговування великої кількості споживачів в єдиній пул для динамічного перерозподілу потужностей між споживачами в умовах постійної зміни попиту на потужності 	<ul style="list-style-type: none"> надані послуги є розширені чи звужені в будь-який момент часу, без додаткових витрат на взаємодію з постачальником, як правило, в автоматичному режимі 	<ul style="list-style-type: none"> постачальник послуг автоматично обчислює спожиті ресурси на певному рівні абстракції і на основі цих даних оцінює об'єм наданих споживачам послуг

Рис. 2. Обовязкові характеристики хмарних сервісів

Дія це		
Портал Онлайн-сервіс державних послуг, де все швидко, чітко й зрозуміло. Тут можна отримати послугу там і тоді, коли потрібно.	Застосунок Мобільний застосунок з електронними документами, та даними про людину з реєстрів	Освіта Портал з онлайн-курсами базовий із цифрової грамотності, для вчителів і для батьків «Онлайн-безпека дітей».
Бізнес Портал з допомоги малому та середньому бізнесу	ЦНАПи Центри надання адміністративних послуг у кожному куточку України. У майбутньому Центри Дія.	Дія City Спеціальний правовий режим для IT-індустрії

Рис. 3. Дія як приклад хмарного сервісу

з різних технічних засобів (мобільних телефонів, планшетів, ПК, ноутбуків тощо) та економічною ефективністю. З точки зору споживача хмарних послуг, то спостерігається мобільність використання даних технологій не тільки з різних пристроїв, але й без прив'язки до місця розташування, способів і умов використання.

Послуги, які надають хмарні сервіси – це інфраструктура як послуга, платформа як послуга та програмне забезпечення як послуга, а також дані як послуга, робоче місце як послуга та інші технологічні тенденції [5]. Всі моделі хмарних сервісів взаємодіють між собою. Проте найбільшою популярністю із послуг, що надаються хмарними сервісами користуються програмне забезпечення як послуга, що характеризується швидкістю та оперативністю роботи, глобальними масштабами залучення користувачів, продуктивністю та надійністю своїх сервісів.

Комп'ютеризація всіх сфер суспільного життя, застосування глобальної мережі, використання найсучасніших технічних засобів дозволило кожному пересічному громадянину апробувати хмарні сервіси, що призначені для реалізації будь-яких питань, вирішення проблем чи задач. Найкращий приклад щодо використання хмарних технологій для громадянина України є створення хмарного онлайн-сервісу Дія, де є оцифровано багато послуг, оновлено законодавчу базу, упорядковано роботу держреєстрів, забезпечено технічні можливості й захист даних не тільки адміністративних послуг, а й галузей охорони здоров'я, бізнесу, освіти, транспорту, судової системи, питань демократії тощо.

Якщо інтегрувати використання хмарних технологій у освітньому процесі, то їх можна реалізувати на різних прикладах: від можливості проведення відеоконференцій з віддаленим доступом різних доповідачів та нерозривністю навчального процесу у кризові періоди розвитку суспільства (епідемії, війн тощо) до ведення електронних журналів чи бібліотек, а також створення навчальних порталів, ресурсів та сервісів.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Дослідження терміну «хмара», похідних «хмарні технології» (в розумінні «розподілені технології») та «хмарні сервіси» аналізували науковці Е. Шмідт, М. Шишкіна [6], М. Попель, С. Литвинова, Л. Черняк, Г. Кисельов, К. Лаврішчев. Використання хмарних технологій в освітньому процесі досліджували Т. Вакалюк [1], А. Стрюк [4], Ю. Лимар [2], О. Самойленко, Т. Гребеник, І. Бацуровська [3] тощо.

Мета роботи – проаналізувати ефективність використання хмарних технологій як інструменту для оцінювання навчальних досягнень.

Виклад основного матеріалу дослідження. Сьогодні існує велика кількість надавачів хмарних послуг, які відрізняються за певними критеріями та об'ємом інформації, яка виділяється користувачу після авторизації для персонального користування. Щодо критеріїв добору хмарних технологій (рис. 4), то слід звернути увагу, що мультитенантність хмарних сервісів дає змогу обслуговувати декілька груп користувачів або організацій освітніх послуг в режимі реального часу з одним і тим же хмарним сервісом [3].

Важливу роль відіграє самообслуговування хмарних сервісів, які невід'ємно пов'язані з авторизацією користувачів, що дає можливість отримати свій віртуальний простір та право доступу до використання ресурсів хмарного сервісу. Правильно налаштований контроль та управління роботи хмарного сервісу дозволяє повноцінно супроводжувати онлайн навчання з використанням інтерактивних технологій, отримати широкий доступ до мультимедійних матеріалів освітніх установ та налагодження комунікації учасників освітнього процесу, які знаходяться у віддалених місцях. При роботі з хмарними сервісами важливими є питання

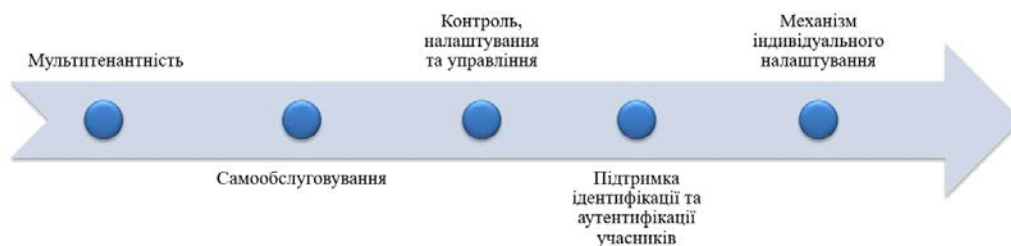


Рис. 4. Критерії добору хмарних технологій у освітньому процесі



інформаційної безпеки користувачів, зокрема, це стосується налагодження механізму підтримки унікальної ідентифікації та аутентифікації учасників освітнього процесу. Дотримання правильної політики використання функціональних можливостей хмарних сервісів дозволяють вибудувати для всіх учасників освітнього процесу індивідуально налаштований інтерфейс з укомплектованими додатками під власні потреби.

На сьогодні існує велика кількість надавачів хмарних сервісів, серед яких великою популярністю користується компанія Google з сервісом Диск (до 15 ГБ), Dropbox (2 ГБ, які можна безкоштовно збільшувати до 16 ГБ), Mega (до 50 ГБ) та Office 365 (до 5 ГБ дискового простору) тощо.

Досить зручними та простими для використання хмарних технологій є цифрові інструменти Google, які володіють потужними функціональними можливостями для використання у різноманітних цілях. Щоб використовувати цифрові інструменти Google, пересічний користувач має можливість відчути їх переваги у професійній діяльності. Це і налаштований акаунт, який користувач зможе собі організувати безкоштовно, це і простий інтерфейс, це і доступ до додатків, які можна використовувати у різних цілях, це і можливість відстежувати зміни у роботі та повертатись до попередньої версії історії роботи з інформацією, це і популярність серед інших типових сервісів та постійне вдосконалення. Застосування користувачем цифрових інструментів Google надає можливість підвищувати цифрову компетентність та самовдосконалюватися і розвиватися.

Хмарні технології можна використовувати для перевірки домашнього завдання, для корекції знань, для викладу нового навчального матеріалу, для виконання типових завдань, для формування вмінь та навичок. Зокрема, сервіс Форма дозволяє легко та швидко, використовуючи вбудовані інструменти, обрати як різні варіанти створення запитань для опитування, так і швидкими способами відповідних налаштувань запустити процес опитування і отримати кінцеві результати.

Щоб створити нову Форму, слід обов'язково мати обліковий запис в Google та перейти на додаток Диск. Відкривши нову Форму, можна побачити вкладки Запитання, Відповіді та Налаштування, кнопки у правому верхньому куті щодо перегляду форми, стилістичного оформлення, відміни останніх дій та можливості Надіслати форму, а також інструменти

для створення різних запитань у Формі, долучення зображень чи відео, розбиття на розділи. Вся інформація, яка вводиться у поля Форми зберігається автоматично, адже сервіс Google має функцію автозбереження та синхронізації на різних технічних засобах. Щоб розбити Форму на розділи, слід скористатись відповідною кнопкою , що дозволяє організувати вітальну частину Форми чи покращити процес ідентифікації користувачів. Щоб створити запитання, достатньо скористатись кнопкою  та обрати тип запитань із запропонованих, як на рис. 5. Створивши запитання, у Формі можна задати ключ опитування та встановити кількість балів за правильну відповідь, копіювати запитання чи видалити, поставити обов'язковість даного запитання, а також можливість перемішати варіанти відповідей (рис. 6).

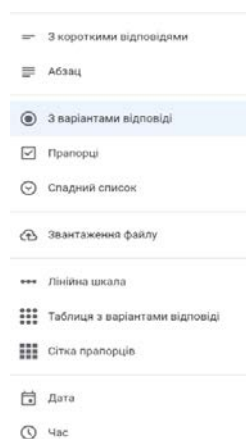


Рис. 5. Способи організації запитань

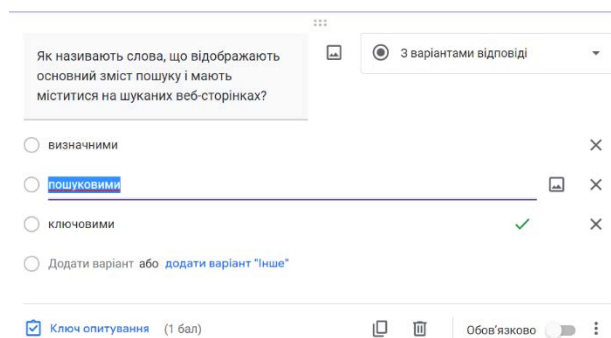


Рис. 6. Запитання з варіантами відповіді

При формування запитань Форми на встановлення відповідності є можливість вимагати відповідь у кожному рядку та відповідно оцінити певною кількістю балів (рис. 7). Коли користувач обирає запитання з короткою чи розлогою відповіддю, то має можливість у ключі опитування одразу прописати можливі варіанти відповіді на дане запитання (рис. 8). Всі варіанти відповідей у конструйованому запитанні, чи самі запитання і їх черговість у Формі можна легко змінювати, перетягуючи у потрібне місце. Визначаючи кількість балів у кожному запитанні, можна отримати підсумковий результат Форми.

Як до формування самого тексту запитання, так і до варіантів відповідей можна добавляти графічні зображення (рис. 9) та відео (рис. 10). Форму можна урізноманітнювати стилістично, обираючи потрібну тему дизайну.

Щодо Налаштування Форми, то можна виставити параметри отримання відповідей (перегляд оцінок, а також правильних, неправильних чи незарахованих відповідей), збір та захист інформації у відповідях (надсилання відповідей вручну чи автоматично після опитування, внесення змін у відповіді після надсилання форми та можливість обмеження респондентів до однієї відповіді), керування відображенням відповідей (демонстрація панелі перебігу, перемішування запитань, показ посилання для повторного заповнення форми, перегляд зведених даних результатів) тощо.

Якщо попередньо згенерувати таблицю відповідей, то автоматично на Диску у поточній папці, де знаходиться створена Форма, з'являється

Таблиця з тою самою назвою, де відображається статистика результатів опитування (рис. 11). Якщо всі параметри Форми виставлено, то можна її переглянути, відредагувати певні елементи за потребою, а згодом використовувати у освітньому процесі.

Отже, можна побачити, що цифровий інструмент Форма від компанії Google повністю адаптований під освітні потреби, як на будь-яких етапах навчального процесу, так і для вирішення різноманітних завдань (від проведення соціологічних опитувань чи анкетувань, до здійснення моніторингу оцінювання результатів навчання). Форма має конструктор для формування бази запитань, дозволяє налаштувати приймання відповідей під потреби користувача, переглядати результати опитування респондентів у формі підсумкових таблиць, а також візуалізувати дані проведених анкетувань. Оскільки додатки Google інтегровані між собою, то використання Форми можна поєднувати як з Класом чи Диском, так і Сайтом чи Блогом.

Висновки. Використання хмарних технологій в освітньому процесі дозволяє отримати повсюдний, зручний і швидкий доступ до обчислювальних ресурсів, що надається у повній взаємодії з постачальником послуг. Хмарні технології, відрізняючись простотою поширення й оновлення, постачають дидактичні матеріали у найбільш надійний та економічний спосіб.

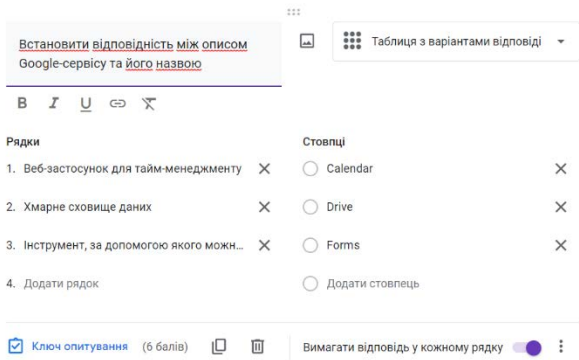


Рис. 7. Запитання на відповідність

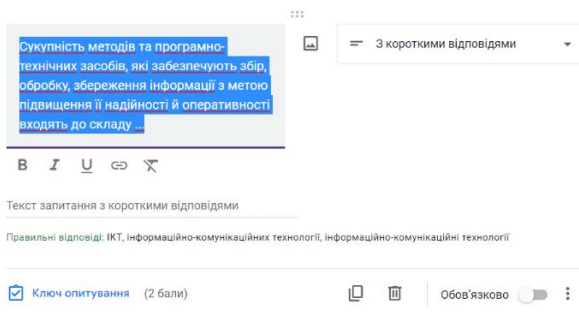


Рис. 8. Запитання відкритого типу

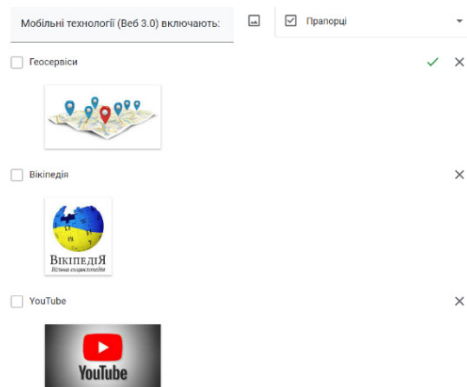


Рис. 9. Долучення зображень до питань

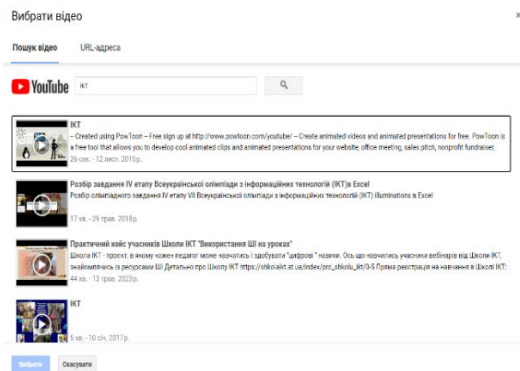


Рис. 10. Долучення до Форми відео

1	2	3	4	5	6	7	8
Позначка часу	Електронна адреса	Результат	Прізвище та ім'я студент	Група та курс	Як називають слова, що	Щоб здійснити автомат	Щоб зберегти на ПК в о Фрагме
15.05.2023 15.02.41	Protsakym05@gmail.com	19 / 50	Процак Трина	СРз-13 Б	визначними	онлайн-перекладчем	Зберегти зображення я Гперис
15.05.2023 15.13.42	kibalukm2@gmail.com	35 / 50	Кибалук Марія	ППз-126	ключовими	онлайн-перекладчем	Зберегти зображення я Гперис
15.05.2023 15.18.19	kristinakravtsov101@gmail.com	42 / 50	Кравець Христина	СРз-135, 1 курс	ключовими	онлайн-перекладчем	Зберегти зображення я Гперис
15.05.2023 15.27.12	olianadosieko999@gmail.com	28 / 50	Недоско (Купчинч) Олі	СРз-135	ключовими	спеціальною граматичн	Зберегти зображення я Гперис
15.05.2023 15.31.26	anastasiasiduchok@gmail.com	25 / 50	Дручок Анастасія	1 курс група До3 - 14Б	ключовими	онлайн-перекладчем	Зберегти зображення я Гперис
15.05.2023 15.56.45	sofiabrubarska@gmail.com	24 / 50	Обрубанська Софія	До3 14Б 1 курс	ключовими	онлайн-перекладчем	Зберегти зображення я Веб-ст
15.05.2023 15.57.26	11225588sk@gmail.com	36 / 50	Коцур Софія	СРз-135	пошуковими	онлайн-перекладчем	Зберегти зображення я Гперис
15.05.2023 16.07.12	viktoriamelnyk716@gmail.com	29 / 50	Мельник Вікторія	1 курс Група СР ² - 13Б	ключовими	онлайн-перекладчем	Зберегти зображення я Гперис
15.05.2023 16.25.20	annasemec05@gmail.com	36 / 50	Семець Ана	ППз-12-Б	ключовими	онлайн-перекладчем	Зберегти зображення я Гперис
15.05.2023 16.25.25	d.mostynets@gmail.com	32 / 50	Мошанець Данііл	ППз-125, 1 курс	ключовими	онлайн-перекладчем	Зберегти зображення я Гперис
15.05.2023 16.25.32	beddeyson618@gmail.com	25 / 50	Мошанець Софія	ППз-125, 1курс	ключовими	онлайн-перекладчем	Зберегти зображення я Гперис
15.05.2023 16.26.57	labayana2005@gmail.com	27 / 50	Лабя Яна	ППз-125	ключовими	онлайн-перекладчем	Зберегти зображення я Гперис
15.05.2023 16.39.22	oherchuk@gmail.com	26 / 50	Огерчук Софія	ППз-125	ключовими	онлайн-перекладчем	Зберегти зображення я Гперис
15.05.2023 16.41.30	vshchynska2004@gmail.com	28 / 50	Шелінська Вероніка	ППз-126	ключовими	онлайн-перекладчем	Зберегти зображення я Гперис
15.05.2023 16.42.06	tvhisense224@gmail.com	26 / 50	Петрик Марта	СРз-135	ключовими	онлайн-перекладчем	Зберегти зображення я Гперис
15.05.2023 16.49.46	innashuhai@gmail.com	30 / 50	Шугай Іна	1 курс (злочна форма) Г	ключовими	онлайн-перекладчем	Зберегти зображення я Гперис
15.05.2023 17.03.22	anemes838@gmail.com	30 / 50	Немеш Яна	ППз-125 1 курс	ключовими	онлайн-перекладчем	Зберегти зображення я Гперис

Рис. 11. Відповіді Форми у Таблицях

Досить зручними та простими для використання хмарних технологій є цифрові інструменти Google. Зокрема, прикладом від компанії Google є Клас, а також Диск, що передбачають можливість працювати групами, обговорювати плани спільних проєктів, розподіляти обов'язки, навчатися спільно працювати в одному документі та спостерігати динаміку зміни колективної роботи, наповнювати освітні проєкти різноманітними сучасними технологіями. Створення

опитування та аналіз даних засобами Google Форма дозволяє не тільки продемонструвати можливості Форми для навчання, але і на власному досвіді провести ефективні засоби контролю. Сервіс Форма дозволяє легко та швидко, використовуючи вбудовані інструменти, обрати як різні варіанти створення запитань для опитування, так і швидкими способами відповідних налаштувань запустити процес опитування і отримати кінцеві результати.

Список літератури:

1. Вакалюк Т.А. Хмарні технології в освіті: навч.-метод. посібник, Житомир: вид-во ЖДУ, 2016. 72 с.
2. Лимар Ю.В. Хмарні технології та Google сервіси: лабораторний практикум для вчителів ЗНЗ. 2017. 64 с.
3. Самойленко О.О., Гребеник Т.В., Бацуровська І.В. Формування відкритого персонального веб-ресурсу викладача на основі хмарних технологій: посібник, Херсон: Гринь Д.С., 2016. 288 с.
4. Стрюк А.М., Рассовицька М.В. Використання хмарних технологій у комбінованому навчанні інформатики студентів інженерних спеціальностей. Вісн. Дніпропетр. ун-ту імені Альфреда Нобеля. Серія: Педагогіка і психологія. 2015. № 1(9). 221-226.
5. Ткачук Г.В. Впровадження в освітній процес хмарних технологій на основі моделі SAAS. Інформаційні технології в професійній діяльності: Матеріали XI Всеукраїнської науково-практичної конференції, Рівне. 2018. 32-33.
6. Шишкіна М.П. Формування і розвиток хмаро орієнтованого освітньо-наукового середовища вищого навчального закладу: монографія, Київ: УкрІНТЕІ, 2015. 256 с.

Vdovychyn T.Ya., Pazyuk R.I. USING CLOUD TECHNOLOGIES AS A TOOL FOR EVALUATING EDUCATIONAL ACHIEVEMENTS

The use of cloud technologies in the educational process makes it possible to form a trained specialist who is competitive in the labor market. In the activities of educational institutions, there is a constant search for forms, methods, methods of using cloud technologies that contribute to increasing the efficiency of the educational process. Therefore, the article demonstrates the use of cloud technologies to increase the efficiency of the educational process, in particular, the activation of cognitive activity and motivation to study, the increase of the volume of work performed, the improvement of knowledge control, the effectiveness of independent and search work, etc. Cloud technologies can be used to implement various tasks facing the educational process, because they differ from other services in the versatility and mobility of service provision. In particular, the article reveals that the factors for the use of cloud technologies are access to the Internet; support on various technical means, synchronization of data in the cloud storage both between services and between educational tools; a personalized cloud educational environment that removes restrictions on geographical distance from the educational institution, and also provides access to educational and methodical materials of the educational institution.

The article demonstrates the use of cloud technologies to monitor knowledge, which allows you to optimize study time and quickly obtain the results of the level of mastery of certain skills. The authors of the article focused attention on Google's digital tools, in particular, the Form, which allows you to test the possibilities of cloud computing in the educational process for organizing the verification of educational achievements. The form has a powerful functionality and designer for forming a database of questions, setting answers and viewing the results of the survey of respondents in the form of summary tables and data visualization, integrated with other Google applications and popular among users due to the ease of operation and clear interface.

Key words: cloud, cloud technologies, educational process, knowledge control.

Глухова Н.В.

Національний технічний університет «Дніпровська політехніка»

КОМП'ЮТЕРНО-ІНТЕГРОВАНА ТЕХНОЛОГІЯ ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСІВ ЕМІСІЇ НОСІЇВ ЗАРЯДУ З ПОВЕРХНІ РІДИННОФАЗНОГО ОБ'ЄКТУ

У статті виконаний огляд сучасних моделей молекулярної структури води, зокрема останні наукові досягнення, які спрямовані на вивчення біологічних властивостей води, що мають безпосередній вплив на її біодоступність та здатність забезпечувати процеси метаболізму у живих клітинах.

З метою удосконалення експериментальних методів дослідження біологічних властивостей води запропоновано комп'ютерно-інтегровану технологію аналізу і параметризації зображень газорозрядного випромінювання зразків води. Фізичний ефект, на основі якого забезпечується отримання та реєстрація зображень газорозрядного випромінювання навколо зразка досліджуваної рідини, полягає у формуванні газових розрядів за рахунок вивільнення носіїв заряду з поверхні зразка унаслідок впливу зовнішнього імпульсного електромагнітного поля. Геометричні та фотометричні параметри зареєстрованих на сенсорній поверхні газових розрядів дозволяють зробити оцінку здатності рідини до емісії вільних носіїв заряду для забезпечення нормального протікання кислотно-відновлювальних реакцій у клітинах живих організмів.

Перевагою запропонованої комп'ютерно-інтегрованої технології оцінки біологічних властивостей води є забезпечення кількісного оцінювання параметрів зображень газорозрядного випромінювання, які корелюють з геометричними та фотометричними ознаками зображень газорозрядного випромінювання і слугують для дослідження зареєстрованих в ході активного вимірювального експерименту особливостей емісії з поверхні зразка рідини вільних носіїв заряду.

У якості параметрів, які описують характерні ознаки зображень газорозрядного випромінювання рідини, запропоновано використання усередненого значення амплітуд спектру потужності та суми коефіцієнтів спектру потужності для складових профілю яскравості на високих частотах зміни яскравості зображення.

Отримані експериментальні результати, які ґрунтуються на дослідженні зразків води з різними біологічними властивостями, підтверджують достовірність запропонованої комп'ютерно-інтегрованої технології оцінки біологічних властивостей води.

Ключові слова: обробка зображень, комп'ютерно-інтегрована технологія, газорозрядне випромінювання, спектральний аналіз зображень.

Постановка проблеми. Проблема якості води існує у багатьох регіонах світу [1–3]. Для дослідження якості води застосовується велике різноманіття показників, для оцінки яких впроваджуються у практику різні методи та засоби досліджень. Можна виділити три основні групи параметрів, за якими виконується оцінка якості води: фізичні, хімічні, біологічні. При виконанні досліджень показників якості з певної групи використовуються різні моделі води.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. На сьогоднішній день розроблено велику кількість моделей води [4–5]. З точки зору встановлення біологічних властивостей води необхідно фокус уваги зосереджувати на будові її молекулярної структури, оскільки однією з найважливіших властивостей води для існування живих клітин

є здатність води забезпечувати належне протікання процесів метаболізму, кислотно-відновлювальних реакцій [6].

Для дослідження молекулярної структури, у тому числі молекулярної динаміки води, на сьогоднішній день запропоновані відповідні теоретичні моделі та експериментальні методи досліджень [7–9]. Для дослідження біологічних властивостей води перспективними виявляються методи активного експерименту, які дозволяють досліджувати явища емісії вільних носіїв заряду зі зразків досліджуваної рідини [6, 9]. Реалізація активного вимірювального експерименту шляхом впливу на досліджуваний зразок води зовнішнього електромагнітного поля забезпечує можливість спостереження та реєстрації газових розрядів, які утворюються за рахунок емісії

вільних носіїв заряду. Можливість емісії вільних носіїв заряду з рідини обумовлена особливостями її молекулярної будови та безпосередньо впливає на біологічні властивості води.

Постановка завдання. На підставі аналізу актуальних наукових досягнень в галузі існуючих моделей молекулярної структури води та запропонованих на сьогоднішній день експериментальних методів досліджень біологічних властивостей води зроблений висновок щодо позитивної обґрунтованості подальшого розвитку та удосконалення методів активного вимірювального експерименту з можливістю автоматизованої обробки їх результатів. Завдання досліджень полягає в розробці комп'ютерно-інтегрованої технології оцінки біологічних властивостей води на базі спектрального аналізу зображень газорозрядного випромінювання зразків води, які отримані в ході активного вимірювального експерименту.

Виклад основного матеріалу дослідження. Біологічні властивості води, зокрема її біодоступність, яка проявляється у здатності забезпечувати процеси метаболізму у живих клітинах, безпосередньо пов'язані з особливостями її молекулярної будови. Однією з останніх запропонованих моделей молекулярної будови води, яка у тому числі описує динамічні процеси емісії вільних носіїв заряду, є модель, розроблена в галузі квантової електродинаміки. Складна динаміка міжмолекулярних зв'язків рідкої фази води пояснюється в рамках запропонованого підходу на базі використання уявлень про формування когерентних доменів [10–12]. Наявність цілого спектру різних моделей молекулярної будови води обумовлена її так званими «аномальними» властивостями, які у певній мірі описуються на базі застосування тієї або іншої моделі [12]. Аналіз існуючих наукових досягнень в галузі досліджень води вказує на обмеженість моделей, які ґрунтуються на представленні молекулярної структури води у вигляді окремих ізольованих молекул. З точки зору дослідження біологічних властивостей води необхідно використання моделей, які описують складні динамічні процеси перетворення міжмолекулярних зв'язків.

В моделі води, розробленій в рамках квантової електродинаміки, складні динамічні процеси міжмолекулярної взаємодії в структурі води враховують наявність так званих когерентних доменів [10, 11]. Когерентні домени виступають джерелами вільних носіїв заряду, які необхідні для нормального протікання процесів метаболізму у клітинах організмів.

Для експериментального дослідження явищ емісії вільних носіїв заряду з поверхні зразків води використаний метод, який являє собою активний вимірювальний експеримент і полягає у впливі зовнішнього електромагнітного поля на досліджуваний зразок [6]. Результат реєстрації просторової картини розповсюдження газового розряду являє собою зображення в аналоговій або цифровій формі у залежності від принципу дії реєструючого пристрою. Якщо зображення зареєстроване в аналоговій формі на фотоносії, то для подальшого комп'ютерного аналізу воно підлягає процедурі аналого-цифрового перетворення. Комп'ютерна обробка зображення газорозрядного випромінювання забезпечує виділення характерних геометричних та фотометричних ознак. У роботах [6, 13, 14] запропоновані підходи комп'ютерної обробки зображень, які забезпечують виділення характерних ознак з гістограм зображень та подальшу класифікацію зображень на певні класи, які виділяються на підставі експертних оцінок або на базі нечіткого кластерного аналізу.

Подальший розвиток досліджень біологічних властивостей води полягає у розробці комп'ютерно-інтегрованої технології, яка реалізує виділення кількісних ознак зображень, що характеризують параметри газорозрядного випромінювання, які корелюють з біологічними властивостями води, а саме з ефектом емісії вільних носіїв заряду з поверхні досліджуваного зразка рідини.

На рис. 1–3 представлено графіки кривих профілів яскравості для зображень, отриманих в результаті реєстрації газових розрядів на межі рідинно-газового об'єкту та газового середовища для різних зразків води (дистильованої, забрудненої домішками нафтопродуктів, природної бутильованої).

Як видно з візуального аналізу профілів яскравості, усі вони мають певні загальні особливості: початкова та кінцева ділянки графіків відповідають зоні фону фотоносія (рентгенівської плівки).

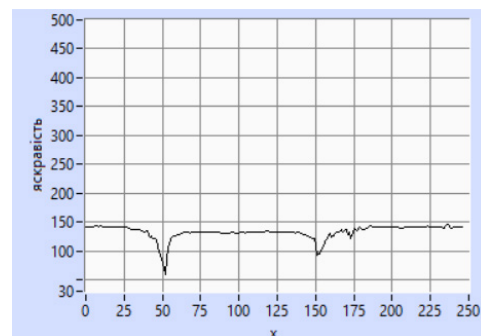


Рис. 1. Профіль яскравості зображення формування газових розрядів навколо зразка дистильованої води



Рис. 2. Профіль яркості зображення формування газових розрядів навколо зразка води з домішками нафтопродуктів

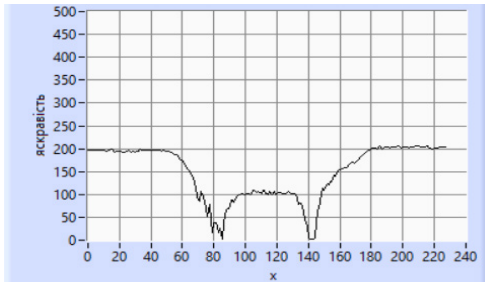


Рис. 3. Профіль яркості зображення формування газових розрядів навколо зразка природної бутильованої води

Поруч з зонами фону спостерігається зниження яркості пікселів, ці ділянки з мінімальною

яскравістю відповідають зоні розповсюдження газових розрядів (на рентгенівський плівці реєструється негативне зображення) навколо досліджуваного зразка; центральна частина графіку профілю яркості відповідає внутрішньому колу зображення – площині, на якій досліджуваний зразок води контактує з фотоносієм.

З точки зору дослідження ефекту емісії вільних носіїв заряду з поверхні рідини необхідно забезпечити деталізацію формування картини газових розрядів на поверхні фотоносія, при цьому бажано усунути з розгляду однакові складові профілю зображення, які є загальними для усіх зображень – фон, форма досліджуваного зразка. Для цього в розробленій комп'ютерно-інтегрованої технології для дослідження біологічних властивостей води застосовується програмний фільтр високих частот. На базі застосування програмної фільтрації отримані графіки високочастотних складових профілю яркості. На рис. 5–6 представлено графіки високочастотних складових відповідно для профілів зображень газорозрядного випромінювання.

З метою кількісної оцінки характерних ознак високочастотних складових профілів яркості для зображень газорозрядного випромінювання

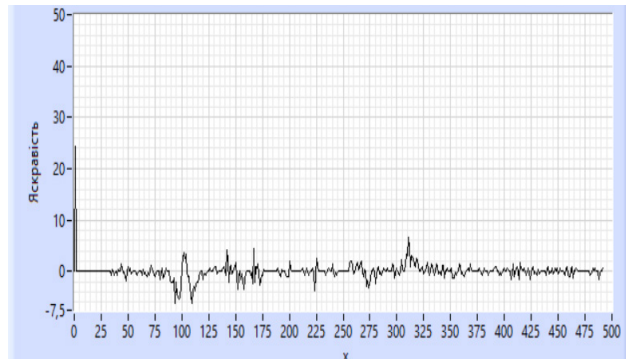
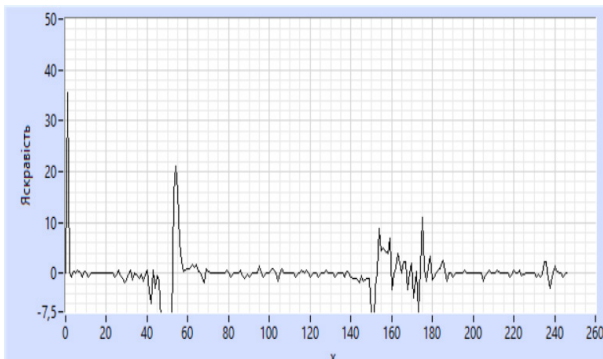


Рис. 5. Графіки високочастотної складової профілю яркості для зразків дистильованої води (а) та води з домішками нафтопродуктів (б)

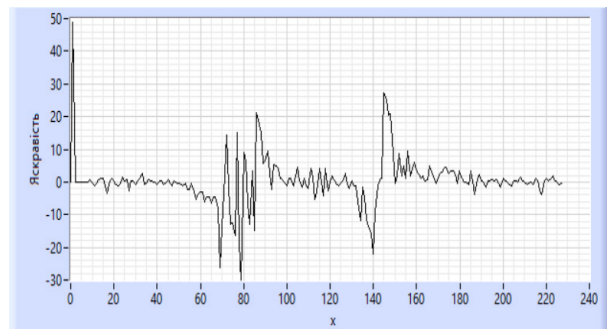
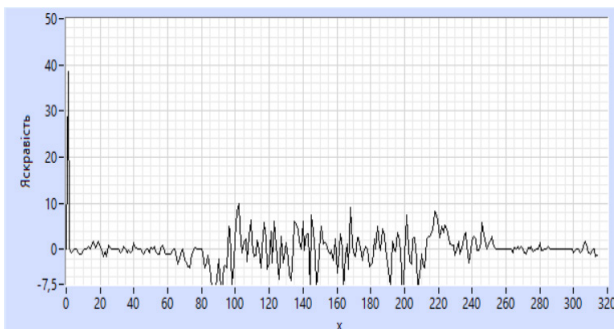


Рис. 7. Графіки високочастотної складової профілю яркості для зразків водопровідної (а) та природної води (б)

в комп'ютерно-інтегрованій технології оцінюється усереднене значення амплітуд спектру потужності та сума коефіцієнтів спектру потужності для складових профілю яскравості на високих частотах після застосування цифрової фільтрації. Результати розрахунку зазначених параметрів для різних зразків води представлені в табл. 1.

Таблиця 1

Значення параметрів зображень випромінювання зразків в електромагнітному полі

Тип зразка	Усереднене значення амплітуд спектру потужності	Сума коеф. спектру потужності для складових профілю яскравості на високих частотах
дистильована	0,12	5,48
з вмістом нафтопродуктів	0,01	2,74
водопровідна з території мегаполісу	0,26	14,23
природна бутильована	0,47	53,68

Як видно з табл. 1, найменші величини усередненого значення амплітуд спектру потужності та суми коефіцієнтів спектру потужності для складових профілю яскравості на високих частотах визначені для зразків води з вмістом нафтопродуктів та для дистильованої. Проаналізуємо отриманий результат кількісної оцінки параметрів для складових профілю яскравості на високих частотах для зображення газорозрядного випромінювання з точки зору фізичних ефектів, які відбуваються під час впливу на досліджуваний зразок зовнішнього електромагнітного поля.

Зразок досліджуваної рідини, розташований в електромагнітному полі високої напруженості, виступає частиною електричного кола. Властивості рідини впливають на особливості формування газового розряду. Таким чином, можна опосередковано встановити характеристики рідини на підставі аналізу геометричних та фотометричних ознак зображення газорозрядного випромінювання.

За рахунок впливу електромагнітного поля забезпечується емісія заряджених частинок з поверхні зразка рідини, що необхідно для старту початкової фази газового розряду. Під час експериментальних досліджень реєструється двови-

мірне зображення за рахунок впливу на сенсорний елемент (в аналоговому варіанті – на рентгенівську плівку, в цифровому варіанті реалізації пристрою реєстрації – на ПЗЗ-матрицю) заряджених частинок та фотонів. Таким чином, ступінь здатності досліджуваного зразка рідини вивільняти з поверхні носії заряду безпосередньо впливає на картину формування газових розрядів.

Як впливає з аналізу табл. 1, мінімальні кількісні значення параметрів для складових профілю яскравості на високих частотах спостерігаються для зразка води з домішками нафтопродуктів, що вказує на найгірші біологічні властивості даного зразка. Невеликі числові параметри для усередненого значення амплітуд спектру потужності та суми коефіцієнтів спектру потужності для складових профілю яскравості на високих частотах також для зразка дистильованої води.

Суттєво більшими показниками усередненого значення амплітуд спектру потужності та суми коефіцієнтів спектру потужності для складових профілю яскравості на високих частотах характеризується зразок природної бутильованої води, що дозволяє зробити висновок про її найкращі біологічні властивості у порівнянні з іншими зразками.

Висновки. В роботі представлено результати розробки комп'ютерно-інтегрованої технології оцінки біологічних властивостей води на базі спектрального аналізу зображень. Зображення формуються на базі впливу на зразок досліджуваної рідини зовнішнім електромагнітним полем, в результаті чого реєструється двовимірне зображення формування газових розрядів навколо зразка. Фізичні процеси, які виникають під час протікання розрядного струму, пов'язані з емісією носіїв заряду з поверхні досліджуваного зразка. Наявність вільних носіїв заряду у зразку рідини та можливість їх вивільнення зі структури води пов'язані з її біологічними властивостями, які проявляються в ході кислотно-відновлювальних реакцій на клітинному рівні і забезпечують нормальне протікання процесів метаболізму живих істот. В комп'ютерно-інтегрованій технології оцінки біологічних властивостей води запропоновано методу кількісної оцінки ознак зображень газорозрядного випромінювання, які характеризують процеси утворення газових розрядів за рахунок вивільнення носіїв заряду з поверхні зразка рідини. Проведені експериментальні дослідження для зразків води з різними біологічними властивостями вказують на достовірність отриманих результатів.

Список літератури:

1. Bacha L., da Silva Bandeira M., Lima V.S., Ventura R., de Rezende C.E., Ottoni A.B., Tschoeke D., Cosenza C., Thompson C., Thompson F. Current Status of Drinking Water Quality in a Latin American Megalopolis. *Water*. 2023. N.15(1):165. <https://doi.org/10.3390/w15010165>.
2. Sarah Acquah, Maura Allaire. Disparities in drinking water quality: evidence from California. *Water Policy*. 2023. N.25(2). P.69–86. <https://doi.org/10.2166/wp.2023.068>.
3. Kelsey Ng, Nikiforos Alygizakis, Maria-Christina Nika, Aikaterini Galani, Peter Oswald, Martina Oswaldova, Ľuboš Čirka, Uwe Kunkel, André Macherius, Manfred Sengl, Giulio Mariani, Simona Tavazzi, Helle Skejo, Bernd M. Gawlik, Nikolaos S. Thomaidis, Jaroslav Slobodnik. Wide-scope target screening characterization of legacy and emerging contaminants in the Danube River Basin by liquid and gas chromatography coupled with high-resolution mass spectrometry. *Water Research*. 2023. Vol. 230. P. 119539. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2022.119539>.
4. David Van der Spoel, Paul J. van Maaren, Herman J C Berendsen. A systematic study of water models for molecular simulation: Derivation of water models optimized for use with a reaction field. *The Journal of chemical physics*. 1998. N.108(24). P.10220-10230. Doi: 10.1063/1.476482.
5. C. Vega, E. de Miguel. Surface tension of the most popular models of water by using the test-area simulation method. *J. Chem. Phys.* 2007. N.126. 154707. <https://doi.org/10.1063/1.2715577>.
6. Глухова Н.В. Інформаційна технологія для дослідження когерентного стану рідини. *Вчені записки Таврійського національного університету імені В.І. Вернадського. Серія: Технічні науки*. 2021. Том 32 (71). № 4. С.60-65. DOI <https://doi.org/10.32838/2663-5941/2021.4/09>.
7. Reich V., Majumdar A., Müller M., Busch S.. Comparison of molecular dynamics simulations of water with neutron and X-ray scattering experiments. *EPJ Web of Conferences*. 2022. Vol.272. 01015. <https://doi.org/10.1051/epjconf/202227201015>.
8. Sachini P. Kadaoluwa Pathirannahalage, Nastaran Meftahi, Aaron Elbourne, Alessia C. G. Weiss, Chris F. McConville, Agilio Padua, David A. Winkler, Margarida Costa Gomes, Tamar L. Greaves, Tu C. Le, Quinn A. Besford, Andrew J. Christofferson. Systematic Comparison of the Structural and Dynamic Properties of Commonly Used Water Models for Molecular Dynamics Simulations. *J. Chem. Inf. Model.* 2021, N. 61, 9, P.4521–4536. <https://doi.org/10.1021/acs.jcim.1c00794>
9. Ignatov I., Antonov A. Neshev N., Niggli H., Stoyanov Ch., Drossinakis Ch. Color Coronal Spectral Analysis of Bioelectrical Effects of Humans and Water. *Contemporary Engineering Sciences*, 2021. Vol. 14, No. 1., PP. 61-72. doi: 10.12988/ces.2021.91781.
10. Messori C. The Super-Coherent State of Biological Water. *OALib Journal*. 2019. № 6(2). Pp. 1-5. DOI:10.4236/oalib.1105236.
11. Bono I., Del Giudice E., Gamberale L., Henry M. Emergence of the Coherent Structure of Liquid Water. *Water*. 2012. N. 4(3), PP. 510-532. <https://doi.org/10.3390/w4030510>.
12. Georgios M. Kontogeorgis, Holster A., Kottaki N., Tsochantaris E., Topsøe F., Poulsen J., Bache M., Liang X., Blom N. S., Kronholm J. Water structure, properties and some applications – A review. *Chemical Thermodynamics and Thermal Analysis*. 2022. Vol. 6. 100053. <https://doi.org/10.1016/j.ctta.2022.100053>.
13. Глухова Н.В. Розробка методу експрес-оцінки біологічних властивостей води. *Східно-європейський журнал передових технологій*. 2014. № 6/5(72). С.18-25.
14. Глухова Н.В., Пісоцька Л.А., Кучук Н.Г. Розробка системи експрес-класифікації води на основі бази даних зображень газорозрядного випромінювання. *Збірник наукових праць Харківського університету повітряних сил ім. І. Кожедуба*. 2015. Вип. 3(44). С. 112-118.

Glukhova N.V. COMPUTER-INTEGRATED TECHNOLOGY OF RESEARCH OF CHARGE CARRIER EMISSION PROCESSES FROM THE SURFACE OF A LIQUID-PHASE OBJECT

The article reviews modern models of the molecular structure of water, in particular, the latest scientific achievements aimed at studying the biological properties of water, which have a direct impact on its bioavailability and ability to support metabolic processes in living cells.

In order to improve the experimental methods of researching the biological properties of water, a computer-integrated technology of analysis and parameterization of images of gas-discharge radiation of water samples is proposed. The physical effect, on the basis of which the acquisition and registration of images of gas-discharge radiation around the sample of the investigated liquid is ensured, consists in the formation of gas discharges due to the release of charge carriers from the surface of the sample as a result of the influence of an external pulsed electromagnetic field. The geometric and photometric parameters of the gas discharges registered on the sensor surface make it possible to estimate the ability of the liquid to emit free charge carriers to ensure the normal flow of acid-reduction reactions in the cells of living organisms.

The advantage of the proposed computer-integrated technology for assessing the biological properties of water is to provide a quantitative assessment of the parameters of the gas-discharge radiation images, which correlate with the geometric and photometric features of the gas-discharge radiation images and serve to study the features of the emission from the surface of a liquid sample of free charge carriers registered during an active measurement experiment.

The use of the averaged value of the power spectrum amplitudes and the sum of the power spectrum coefficients for the components of the brightness profile at high frequencies of image brightness change is proposed as parameters that describe the characteristic features of images of gas-discharge liquid radiation.

The obtained experimental results, which are based on the study of water samples with different biological properties, confirm the reliability of the proposed computer-integrated technology for assessing the biological properties of water.

Key words: *image processing, computer-integrated technology, gas discharge radiation, spectral image analysis.*

Завгородній В.В.

Державний університет інфраструктури та технологій

Завгородня Г.А.

Державний університет інфраструктури та технологій

Сіденков Г.Г.

Державний університет інфраструктури та технологій

РОЗРОБКА ПРОГРАМНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ДЛЯ ВІЗУАЛІЗАЦІЇ ГІРСЬКИХ ПОРІД НА ОСНОВІ МЕТОДУ ФЛЕТЧЕРА-РІВСА

Було розроблено та вдосконалено алгоритмічне та програмне забезпечення, що відкриває нові можливості для детального картування гірських порід в їх природному заляганні. Нова методологія базується не лише на розрахунку параметрів густини, ефективної намагніченості, а також на вивченні наподегливості навантаження активної та залишкової намагніченості. Ця нова класифікація порід дозволяє отримати більш точні та вичерпні дані про геологічні структури та тектонічні особливості земної кори.

В роботі використовувався алгоритм Флетчера-Рівса для розв'язання задач оптимізації без обмежень, який поєднує в собі напрямки пошуку методу найшвидшого спуску і методу покоординатного спуску. Він базується на ідеї пов'язаних напрямків, які використовуються для знаходження апроксимації гессіана (матриці других похідних) функції, яку потрібно мінімізувати.

Новий підхід виявився особливо ефективним при дослідженні складних геологічних утворень. Він надає можливість вивчати структурно-тектонічні елементи земної кори з більшою точністю та деталізацією, що важливо для розуміння геологічних процесів та історії розвитку регіонів. Диференційований підхід також дозволяє чітко розрізняти різні типи порід, такі як інтрузивні, ефузивні та осадові. Це має важливе значення для геологічного картографування та визначення генетичного зв'язку між цими різновидами порід. Це може бути корисно для розуміння їхнього походження, еволюції та впливу геологічних процесів на формування ландшафту.

Застосування розробленого програмного забезпечення забезпечує більш глибоке розуміння геологічної структури регіонів, сприяючи виявленню раніше невидимих зв'язків між геологічними об'єктами. Такий підхід відкриває нові перспективи для наукових досліджень, а також має практичне застосування у геологічній діяльності, розвідці корисних копалин та природних ресурсів.

Ключові слова: задача оптимізації, алгоритм Флетчера-Рівса, метод зворотного поширення, програмне забезпечення, картографування.

Постановка проблеми. Геофізика, як одна із галузей наук про Землю, сформувалася на засадах та досягненнях фізичного підходу до вивчення навколишнього світу і спрямована на виявлення сутності та природи явищ та процесів, що відбуваються на Землі [1]. Встановлено таке визначення: геофізика – це комплекс наук, які застосовують фізичні методи для дослідження структури, еволюції, властивостей, будови та хімічного складу Землі, а також природних та антропогенних процесів, що відбуваються в її межах. Об'єктом дослідження геофізики є [2]:

– Земля в цілому та її геосфери (наприклад, літосфера, гідросфера, атмосфера);

– геологічні процеси (рух літосферних плит, землетруси);

– геологічні середовища (масиви гірських порід);

– геологічні об'єкти (наприклад, родовища корисних копалин, ключові результати геофізичних досліджень).

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Теоретичні інтерпретації потенціальних полів можна розділити на кілька напрямів, пов'язаних з подальшим розвитком методів розв'язання прямих задач, використанням інтегральних методів, аналітичним продовженням униз, а також засобами вирішення самого зворотного завдання [3].

Методи розв'язання прямої задачі мають велике значення в інтерпретації гравітаційних та магнітних полів. Вони дозволяють відтворити поля, викликані розподілом мас або намагніченості,

що є актуальним завданням. Ці методи постійно вдосконалюються для забезпечення більш точних результатів. Інтегральні методи є потужним інструментом для обробки даних гравітаційних та магнітних вимірювань. Вони базуються на математичних інтегралах, що дозволяють отримувати відомості в областях, недоступних для прямих вимірювань [4]. Ці методи забезпечують більш повне розуміння внутрішньої структури досліджуваних об'єктів.

Аналітичне продовження униз є однією з ключових стратегій для дослідження глибинних структур [5]. Цей підхід дозволяє отримувати інформацію про потенціальні поля на більших глибинах, ніж це можливо за допомогою прямих вимірювань. Він базується на аналітичних методах та математичних принципах, що допомагають реконструювати структури зі зменшеною кількістю доступних даних.

Методи розв'язання зворотного завдання стають дедалі більш важливими для точної інтерпретації даних [6]. Вони дозволяють відтворювати розподіл мас та намагніченості на основі вимірів потенціальних полів. Це допомагає дослідникам здійснювати більш точну оцінку внутрішньої структури об'єктів з використанням доступних даних.

В цілому, розвиток методів розв'язання прямих та зворотних завдань є ключовим для розширення наших знань про внутрішню будову геологічних об'єктів за допомогою гравітаційних та магнітних вимірювань.

Метою статті є розробка програмного забезпечення з метою картографування гірських порід за їх густинними та магнітними властивостями.

Виклад основного матеріалу. Головною метою даної роботи є створення цифрової моделі вивченої території (теоретичної, розрахункової) таким чином, щоб модель магнітних і гравітаційних полів повністю відповідала спостережуваним магнітним і гравіметричним даним. При цьому отримана модель повинна точно відображати геологічну структуру досліджуваної області. Тобто, густинні і магнітні характеристики кожного блоку цифрової моделі повинні бути ідентичні реальним значенням. Першим етапом до вирішення цієї задачі був обраний метод підбору.

Методи підбору базуються на вирішенні прямих і зворотних завдань граві- та магніторозвідки. При розробці алгоритмів програм для розвідки об'єктів та систем геологічних формувань враховуються оптимальні методи апроксимації об'єктів шляхом їх подання у вигляді максимальної моделі, а також використовуються вхідні умови.

Відомо, що магнітні властивості будь-якого намагнічуючого об'єкта майже завжди є неоднорідними. Навіть при детальному вивченні цих властивостей важко точно відтворити картину їх розподілу по всьому об'єкту. Тому в залишковому магнітному явищі існують припущення, що виникають через неповне врахування характеру розподілу магнітних властивостей у всьому досліджуваному об'єкті.

Для того щоб ця похибка була незначною, необхідно належним чином підібрати значення фізичних характеристик при наданні моделі магнітних властивостей намагнічуючих об'єктів. Величина намагніченості MAG_{vol} повинна бути обрана так, щоб обумовлений магнітний момент MAG_{mag} дорівнював би істинному моменту MOM_{true} , який можна визначити за наступною формулою:

$$MOM_{true} = OBJ_{vol_1} MAG_{vol_1} + OBJ_{vol_2} MAG_{vol_2} + \dots + OBJ_{vol_n} MAG_{vol_n} \quad (1)$$

де: $OBJ_{vol_1} + OBJ_{vol_2} + \dots + OBJ_{vol_n} = OBJ_{vol}$ – об'єм досліджуваного об'єкта.

Тоді, $MAG_{mag} = MAG_{true}$, або $OBJ_{vol} MAG_{vol} = OBJ_{vol_1} MAG_{vol_1} + OBJ_{vol_2} MAG_{vol_2} + \dots + OBJ_{vol_n} MAG_{vol_n}$ та

$$MAG_{vol} = \frac{OBJ_{vol_1} MAG_{vol_1} + OBJ_{vol_2} MAG_{vol_2} + \dots + OBJ_{vol_n} MAG_{vol_n}}{OBJ_{vol}}$$

Величина MAG_{vol} обчислюється як середньозважена значення, де увага приділяється об'ємам окремих частин об'єкта, що мають однорідну намагніченість. Використання середньозваженої намагніченості допомагає уникнути суттєвих похибок у залишковому магнітному полі.

Отримання середньозваженої намагніченості для порід і руд з вимірювань фізичних властивостей зразків є складним завданням через труднощі в розподілі магнітних і немагнітних частин порід і руд. Однак для деяких простих за будовою об'єктів можна приблизно визначити середньозважену (ефективну) намагніченість на основі вимірювань магнітних властивостей зразків. Можливо, більш надійним методом отримання середньозваженої (ефективної) намагніченості є метод підбору, що базується на використанні методу найменших квадратів.

Розглянемо рішення прямої тривимірної задачі магніторозвідки для об'єктів будь-якої форми. Будь-який неоднорідний магнітний об'єкт можна приблизно розглядати як сукупність окремих частин, кожна з яких є одноразово намагніченою. Тоді магнітне поле, створене цим об'єктом, може бути апроксимовано як сума полів, створених цими частинами. Крім того, компоненти магнітної

індукції для кожної з цих частин можуть бути виражені через інші компоненти. Заформуємо це за допомогою рівняння Пуассона:

$$\begin{cases} MAG_{ind_A} = MAG_{vol_A}OBJ_{vol_{AA}} + MAG_{vol_B}OBJ_{vol_{AB}} + MAG_{vol_C}OBJ_{vol_{AC}} \\ MAG_{ind_B} = MAG_{vol_A}OBJ_{vol_{BA}} + MAG_{vol_B}OBJ_{vol_{BB}} + MAG_{vol_C}OBJ_{vol_{BC}} \\ C = MAG_{vol_A}OBJ_{vol_{CA}} + MAG_{vol_B}OBJ_{vol_{CB}} + MAG_{vol_C}OBJ_{vol_{CC}} \end{cases} \quad (2)$$

де: MAG_{ind_A} , MAG_{ind_B} , C – компоненти магнітної індукції, $OBJ_{vol_{AA}}$, $OBJ_{vol_{AB}}$, $OBJ_{vol_{AC}}$, $OBJ_{vol_{BA}}$, $OBJ_{vol_{BB}}$, $OBJ_{vol_{BC}}$, $OBJ_{vol_{CA}}$, $OBJ_{vol_{CB}}$, $OBJ_{vol_{CC}}$ – другі похідні від гравітаційного потенціалу. Другі похідні від гравітаційного потенціалу можна отримати шляхом інтегрування та диференціювання виразів для перших похідних гравітаційного потенціалу відносно матеріальної точки. Наведемо остаточні формули для других похідних для прямокутних паралелепіпедів.

Для розрахунку гравітаційного потенціалу, створеного від окремого тіла, яке моделюється як набір прямокутних паралелепіпедів, можна використовувати наступні математичні формули:

$$OBJ_{vol_{AA}}(a, b, c) \approx \sum_{j=1}^k arctg \frac{(b-k)(c-\varphi)}{(a-\gamma)\sqrt{(a-\gamma)^2+(b-\lambda)^2+(c-\varphi)^2}} \left| \begin{matrix} a_{1j} & b_{1j} & c_{1j} \\ a_{2j} & b_{2j} & c_{2j} \end{matrix} \right|, \quad (3)$$

$$OBJ_{vol_{AB}}(a, b, c) \approx -\sum_{j=1}^k \ln \left[\frac{\sqrt{(a-\gamma)^2+(b-\lambda)^2+(c-\varphi)^2} + \left| \begin{matrix} a_{1j} & b_{1j} & c_{1j} \\ a_{2j} & b_{2j} & c_{2j} \end{matrix} \right|}{(c-\varphi)} \right], \quad (4)$$

$$OBJ_{vol_{AC}}(a, b, c) \approx -\sum_{j=1}^k \ln \left[\frac{\sqrt{(a-\gamma)^2+(b-\lambda)^2+(c-\varphi)^2} + \left| \begin{matrix} a_{1j} & b_{1j} & c_{1j} \\ a_{2j} & b_{2j} & c_{2j} \end{matrix} \right|}{(b-\lambda)} \right], \quad (5)$$

$$OBJ_{vol_{CC}}(a, b, c) \approx \sum_{j=1}^k arctg \frac{(a-\gamma)(c-\varphi)}{(b-\lambda)\sqrt{(a-\gamma)^2+(b-\lambda)^2+(c-\varphi)^2}} \left| \begin{matrix} a_{1j} & b_{1j} & c_{1j} \\ a_{2j} & b_{2j} & c_{2j} \end{matrix} \right|, \quad (6)$$

$$OBJ_{vol_{BC}}(a, b, c) \approx -\sum_{j=1}^k \ln \left[\frac{\sqrt{(a-\gamma)^2+(b-\lambda)^2+(c-\varphi)^2} + \left| \begin{matrix} a_{1j} & b_{1j} & c_{1j} \\ a_{2j} & b_{2j} & c_{2j} \end{matrix} \right|}{(a-\gamma)} \right], \quad (7)$$

$$OBJ_{vol_{AA}}(a, b, c) \approx \sum_{j=1}^k arctg \frac{(b-k)(c-\varphi)}{(a-\gamma)\sqrt{(a-\gamma)^2+(b-\lambda)^2+(c-\varphi)^2}} \left| \begin{matrix} a_{1j} & b_{1j} & c_{1j} \\ a_{2j} & b_{2j} & c_{2j} \end{matrix} \right|, \quad (8)$$

Під час обчислення ми підставляємо значення для меж та інших параметрів, таких як довжина, ширина та висота кожного прямокутного паралелепіпеда. Окремі позначення, такі як α_{1j} , b_{1j} , c_{1j} , α_{2j} , b_{2j} , c_{2j} , використовуються для кожного з прямокутних паралелепіпедів, причому $\alpha_{1j} > \alpha_{2j}$, $b_{1j} > b_{2j}$, $c_{1j} > c_{2j}$. Важливо врахувати, що $j \in [1; k]$ позначає відповідний масив чисел, який визначає параметри кожного паралелепіпеда.

На основі цих рівнянь можна скласти систему лінійних алгебраїчних рівнянь, яка представляє собою систему рівнянь, що описують взаємодію між гравітаційними потенціалами від кожного окремого паралелепіпеда. Така система рівнянь виглядає наступним чином:

$$\begin{cases} MAG_{vol_A}OBJ_{vol_{CA_1}} + MAG_{vol_B}OBJ_{vol_{CB_1}} + MAG_{vol_C}OBJ_{vol_{CA_1}} = C_1; \\ MAG_{vol_A}OBJ_{vol_{CA_2}} + MAG_{vol_B}OBJ_{vol_{CB_2}} + MAG_{vol_C}OBJ_{vol_{CA_2}} = C_2; \\ MAG_{vol_A}OBJ_{vol_{CA_3}} + MAG_{vol_B}OBJ_{vol_{CB_3}} + MAG_{vol_C}OBJ_{vol_{CA_3}} = C_3; \\ \dots \\ MAG_{vol_A}OBJ_{vol_{CA_k}} + MAG_{vol_B}OBJ_{vol_{CB_k}} + MAG_{vol_C}OBJ_{vol_{CA_k}} = C_k; \end{cases} \quad (9)$$

Для отримання вихідних результатів необхідно мати наявність числових даних про параметри кож-

ного прямокутного паралелепіпеда, такі як його маса, розміри та розташування. Ці дані можуть бути подані у вигляді масивів, які містять відповідні значення.

Подібним чином, можна визначити і густину гравітаційного потенціалу для інших геометричних форм, таких як сфери чи циліндри. Такі обчислення дозволяють досліджувати вплив різних геометричних структур на гравітаційне поле. Гравітаційна взаємодія однорідного прямокутного паралелепіпеда, грані якого паралельні координатним площинам, визначається в точках осі за допомогою виразів (10) – (12):

$$\Delta\omega = -F\psi(\gamma - a) \ln(\lambda + Q) + \lambda \ln[(\gamma - a) + Q] + \gamma arctg \frac{\lambda}{\gamma} - \quad (10)$$

$$\gamma arctg \frac{(\gamma - a)\lambda}{\gamma Q} \left| \begin{matrix} \gamma_2 & \lambda_2 \\ \gamma_1 & \lambda_1 \end{matrix} \right| \gamma_1$$

$$OBJ_{vol_{AA}} = F\psi \left| \ln(\lambda + Q) \right| \begin{matrix} \gamma_2 & \lambda_2 \\ \gamma_1 & \lambda_1 \end{matrix} \gamma_1 \quad (11)$$

$$OBJ_{vol_{CC}} = -F\psi \left| arctg \frac{(\gamma - a)\lambda}{\gamma Q} \right| \begin{matrix} \gamma_2 & \lambda_2 \\ \gamma_1 & \lambda_1 \end{matrix} \gamma_1 \quad (12)$$

де: $Q = \sqrt{(\gamma - a)^2 + \lambda^2 + \gamma^2}$.

Під час розв'язання конкретної задачі мінімізації, перш за все, необхідно обрати математичний підхід, який би призводив до отримання остаточних результатів з найменшими обчислювальними витратами або забезпечував більший обсяг інформації щодо шуканого рішення. Найбільш розповсюдженими методами при розв'язанні обернених задач є метод Ньютона та метод найшвидшого спуску. Проте для даної задачі найбільш підходящим є метод Флетчера-Рівса.

Метод пов'язаних напрямів полягає у відхиленні від напрямку найшвидшого спуску шляхом додавання до нього напрямку, який використовувався на попередньому кроці. В методі пов'язаного градієнта формується послідовність напрямків пошуку $Dir^{(s)}$, які є лінійними комбінаціями градієнта поточного напрямку найшвидшого спуску та попередніх напрямків пошуку:

$$Dir^{(s+1)} = -\nabla p(\alpha^{(s)}) + \sum_{j=1}^s \alpha_j Dir^{(j)} \quad (13)$$

$$\nabla^2 p(\alpha^{(s)}, Dir^{(s)}) = 0.$$

Коефіцієнти α_i обираються таким чином, щоб новий напрямок $Dir^{(s)}$ був пов'язаний з усіма попередніми напрямками. Умовою завершення процесу пошуку є виконання умови: $\nabla^2 \rho(\alpha^{(s)}, Dir^{(s)}) = 0$.

Основні кроки алгоритму Флетчера-Рівса:

1. Ініціалізація: вибираємо початкову точку x_0 , задаємо початковий напрямок пошуку d_0 (наприклад, можна взяти початковий напрямок як градієнт функції в початковій точці).

2. Крок оптимізації: для кожного кроку $k(k=0, 1, 2, \dots)$, робимо:

– обчислюємо крок альфа (αk), який визначає, як далеко ми будемо рухатися в напрямку dk від

поточної точки xk . Можна використовувати метод одновимірного пошуку, такий як метод золотого перетину чи метод параболічного апроксимування;

- обчислюємо нову точку $xk + 1 = xk + \alpha k \times dk$;
- обчислюємо градієнт функції в точці $xk + 1$.

3. Оновлення напрямку пошуку: Обчислюємо новий напрямок пошуку $dk + 1$, використовуючи попередні напрямки пошуку dk та градієнт функції в точці $xk + 1$. Один з поширено використовуваних способів отримання нового напрямку – це формула Флетчера-Рівса.

4. Умова завершення: перевіряємо критерій завершення. Це може бути досягнення заданої точності, задана кількість ітерацій, чи інший критерій.

Алгоритм продовжується до тих пір, поки не буде виконана умова завершення. Кожен крок оновлення включає обчислення нової точки та нового напрямку, що базується на попередніх напрямках та градієнтах. Цей метод спрямований на збільшення швидкості збіжності, використовуючи інформацію про кривизну функції.

Метод демонструє квадратичну збіжність. Вигода алгоритму Флетчера-Рівса полягає у тому, що він уникає обчислення матриці і заощаджує використання пам'яті на обчислювальному пристрої, оскільки він не оперує матрицями, як це робиться в методах типу Ньютона. Цей метод демонструє ефективність, схожу з алгоритмами квазі-Ньютонівського типу. Оскільки напрямки пошуку взаємно пов'язані, квадратична функція зазвичай буде мінімізована не більш як за n кроків.

У загальному випадку, для досягнення результату використовується метод зворотного поширення, що

дозволяє отримати результат. Алгоритм Флетчера-Рівса досить чутливий до точності одновимірного пошуку, тому при його застосуванні важливо уникати помилок округлення, які можуть виникнути.

На рисунку 1 наведено приклад екранної форми вибору параметрів задачі у розробленому програмному забезпеченні для картографування гірських порід за їх густинними та магнітними властивостями.

Дана система надає можливість здійснювати автоматизований розрахунок підбору однорідної намагніченості/густини, у тому числі збереження повного журналу розрахунку в документ *.csv.

Слід зазначити, що алгоритм може відмовити у випадках, коли Гессіан стає погано умовленим. Немає загальних гарантій щодо збіжності, хоча практичний досвід показує, що майже завжди алгоритм призводить до прийняттого рівня наближеного оптимуму.

Висновки. У даному дослідженні для розробки програмного забезпечення з метою картографування гірських порід за їх густинними та магнітними властивостями використовувався метод зворотного поширення на основі алгоритму Флетчера-Рівса.

Одна з ключових переваг даного підходу – це можливість диференційованої ідентифікації різних типів гірських порід. Це дає змогу більш точно визначити, чи маємо ми справу з інтрузивними, ефузивними чи осадовими породами. Такий рівень деталізації може надати цінну інформацію для геологічного дослідження та планування дій у гірських регіонах.

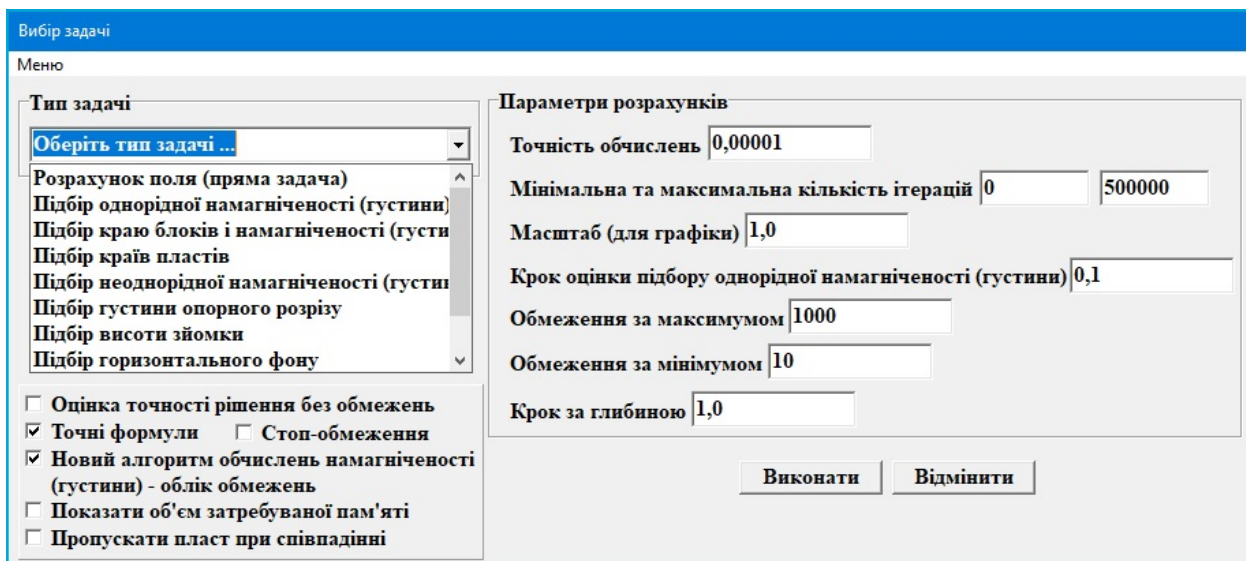


Рис. 1. Вибір параметрів задачі у програмному забезпеченні для картографування гірських порід за їх густинними та магнітними властивостями

З урахуванням цих висновків, можна сказати, що алгоритм Флетчера-Рівса є потужним методом оптимізації, який може використовуватися для знаходження оптимальних значень параметрів у складних функціях. Однак, важливо мати на увазі чутливість до точності обчислень та можливість проблем з погано умовленим Гессіаном.

Загалом, робота відкриває нові можливості для більш точного та деталізованого вивчення гео-

логічних процесів та формацій, що може знайти застосування як у наукових дослідженнях, так і в практичних галузях, наприклад, в геологічній розвідці та геологічному картографуванні.

У подальших дослідженнях можливо розглянути розширення методології для врахування інших параметрів, які також можуть впливати на геологічні формації, таких як температура, тиск та хімічний склад середовища.

Список літератури:

1. Зацерковний В.І., Бурачек В.Г., Железняк О.О., Терещенко А.О. Геоінформаційні системи і бази даних : монографія. Кн. 2 / В.І. Зацерковний, В.Г. Бурачек, О.О. Железняк, А.О. Терещенко. Ніжин : НДУ ім. М. Гоголя, 2017. 237 с. ISBN 978-617-527-121-6
2. Шипулін В.Д. Основи ГІС-аналізу: навч. посібник / В.Д. Шипулін ; Харк. нац. ун-т міськ. госп-ва ім. О.М. Бекетова. Х. : ХНУМГ, 2014. 330 с. ISBN 978-966-695-314-1
3. Демчина М.М. Формальні методи інтерпретації даних та знань про нафтогазові об'єкти / М.М. Демчина, В.Р. Процюк, В.І. Шекета // *Науковий вісник Івано-Франківського національного технічного університету нафти і газу*. 2011. № 1. С. 100-108.
4. Бестильний М.Я. Формальні основи комп'ютерної інтерпретації даних геофізичних досліджень свердловин [Електронний ресурс] / М.Я. Бестильний, О.Ф. Козак, В.М. Юрчишин. // *Науковий вісник Івано-Франківського національного технічного університету нафти і газу*. 2012. № 3. URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/Nvif_2012_3_21
5. Костріков С.В., Черваньов І.Г., Спиця Р.О. Застосування ГІС-технологій для морфоструктурно-неотектонічних досліджень / С.В. Костріков, І.Г. Черваньов, Р.О. Спиця // *Морфоструктурно-неотектонічний аналіз території України*. Київ: Наукова думка, 2013. С. 119–136.
6. Костріков С.В. Геоінформаційне моделювання природно-антропогенного довкілля. Наукова монографія / С.В. Костріков // Харків: Вид-во ХНУ ім. В.Н. Каразіна. 2014. 484 с.

Zavgorodnii V.V., Zavgorodnya A.A., Sidenkov H.G. DEVELOPMENT OF SOFTWARE FOR VISUALIZATION OF ROCKS BASED ON THE FLETCHER-REEVES METHOD

Algorithmic and software was developed and improved, opening up new opportunities for detailed mapping of rocks in their natural setting. The new methodology is based not only on the calculation of density parameters, effective magnetization, but also on the study of the load persistence of active and residual magnetization. This new classification of rocks makes it possible to obtain more accurate and comprehensive data on geological structures and tectonic features of the earth's crust.

The paper used the Fletcher-Reeves algorithm for solving unconstrained optimization problems, which combines the search directions of the fastest descent method and the coordinate descent method. It is based on the idea of connected directions, which are used to find an approximation of the Hessian (second derivative matrix) of the function to be minimized.

The new approach turned out to be particularly effective in the study of complex geological formations. It provides an opportunity to study the structural and tectonic elements of the earth's crust with greater accuracy and detail, which is important for understanding geological processes and the history of regional development. The differentiated approach also allows for a clear distinction between different rock types such as intrusive, effusive and sedimentary. This is important for geological mapping and determining the genetic relationship between these types of rocks. This can be useful for understanding their origin, evolution and influence of geological processes on landscape formation.

The application of the developed software provides a deeper understanding of the geological structure of the regions, contributing to the discovery of previously invisible connections between geological objects. This approach opens up new perspectives for scientific research, and also has practical applications in geological activity, exploration of minerals and natural resources.

Key words: optimization problem, Fletcher-Reeves algorithm, backpropagation method, software, mapping.

УДК 517.977.5

DOI <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2023.5/22>**Корнієнко Б.Я.**Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»**Нестерук А.О.**Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

СИСТЕМА УПРАВЛІННЯ ВИРОБНИЦТВОМ ГРАНУЛЬОВАНИХ МІНЕРАЛЬНИХ ДОБРІВ У ПСЕВДОЗРІДЖЕНОМУ ШАРІ

Проведено системний аналіз підходів до побудови систем управління виробництвом гранульованих мінеральних добрив у псевдозрідженому шарі. Робота має на меті розробку оптимальної системи управління для забезпечення ефективного та стабільного виробництва гранульованих добрив у складному середовищі псевдозрідженого шару. У ході дослідження було визначено основний технологічний параметр, що впливає на якість та продуктивність процесу виготовлення мінеральних добрив – розмір частинок. Він залежить від властивостей використовуваних речовин, режиму процесу та інших факторів, що визначають характер взаємодії між фазами процесу гранулювання у псевдозрідженому шарі. Для побудови системи управління була використана математична модель балансу популяції в різних зонах гранулятора. Ця модель дозволила враховувати динаміку частинок та їх взаємодію у псевдозрідженому середовищі. Основним компонентом розробленої системи управління є MPC (Model Predictive Control) регулятор. MPC використовує математичну модель процесу для передбачення майбутнього стану системи та прийняття оптимальних рішень щодо управління. Цей регулятор був обраний через його здатність адаптуватися до змінних умов нелінійних систем та враховувати обмеження величини управління. Додатково була визначена передавальна функція системи на основі моделі, що дозволило провести оцінку ефективності розробленої системи з використанням MPC регулятора. Для створення системи використовуються пакети програмного забезпечення MatLab Simulink, MPC Designer і System Identification Toolbox. Ця робота відкриває можливості для покращення процесу виробництва гранульованих мінеральних добрив у складних умовах псевдозрідженого середовища, а саме управління за якістю кінцевої продукції – гранульованих мінеральних добрив, та може бути корисною для промислових підприємств, які займаються виробництвом гранульованих добрив та супутньої продукції.

Ключові слова: система управління, математична модель, гранулювання, псевдозріджений шар, мінеральні добрива.

Постановка проблеми. Процес грануляції частинок широко поширений в різних сегментах виробництва, в хімічній і фармацевтичній промисловості, оскільки значно покращує якість кінцевих продуктів за рахунок підвищення механічної стабільності частинок, захисту від мікроорганізмів і зовнішніх фізичних факторів, таких як надмірне тепло, вологість і вплив світла. Крім того, кращі умови обробки забезпечуються за рахунок збільшення розміру і щільності частинок. Дуже важлива стабільність режиму псевдозрідження під час операцій нанесення покриттів і гранулювання, що виконуються в псевдозрідженому шарі. При висушуванні виникають зони без активності, відбувається агломерація частинок, знижуються коефіцієнти тепло- і масопередачі, що може призвести до зупинки процесу на декілька хвилин. В екстремальних ситуаціях це може призвести

до повного руйнування шару. Вміст вологи та діаметр частинок є критичними параметрами, оскільки вони впливають на стабільність псевдозрідження, тому вони потребують як моніторингу, так і управління [1, 2].

Аналіз останніх досліджень і публікацій. На виробництві найпоширенішим методом управління є контроль перепаду тиску [3-6]. Також для управління процесом гранулювання використовується метод управління споживання електроенергії системою змішування [7, 8]. Основними параметрами якості готової продукції є вологість і розмір гранул – відповідно, на основі цих параметрів реалізовано ряд систем управління [9-12]. На процес гранулювання в грануляторі великий вплив мають такі параметри: температура гранул, температура теплоносія і вологість гранул. Вологість гранул, температура теплоносія і темпера-

тура гранул тісно пов'язані між собою, тому що якщо температура теплоносія виходить за межі температурного діапазону, відбудеться надмірний нагрів гранул і критичне зниження вологості гранул. Для побудови системи управління процесом гранулювання в псевдозрідженому шарі запропоновано використовувати температуру теплоносія та температуру гранул [13–44].

Метою статті є створення системи управління виробництвом мінеральних добрив з метою зниження витрат енергоресурсів та підвищення продуктивності.

Виклад основного матеріалу.

Математична модель процесу грануляції в псевдозрідженому шарі.

При гранулюванні розчинів за допомогою дегідратації на перший план висувається вимога отримання продукту з певним гранулометричним складом. В цілому механізм росту гранул залежить від властивостей використовуваних речовин, режиму процесу та інших факторів, що визначають характер взаємодії між дисперсною рідкою і твердою фазами.

У нашому випадку численні дослідження підтвердили, що на стан готового продукту, основним показником якості якого є еквівалентний діаметр частинок, найбільше впливає температура псевдозрідженого шару, в якому вони формуються (рис. 1). У гранулятор з псевдозрідженим шаром 1 за допомогою виконавчого пристрою 2 подається розчин, а виконавчим пристроєм 3 – грануляційні частинки. Підігрітий теплоносій – повітря, подається знизу вгору. За допомогою виконавчого пристрою 4 вивантажується готовий продукт – гранули.

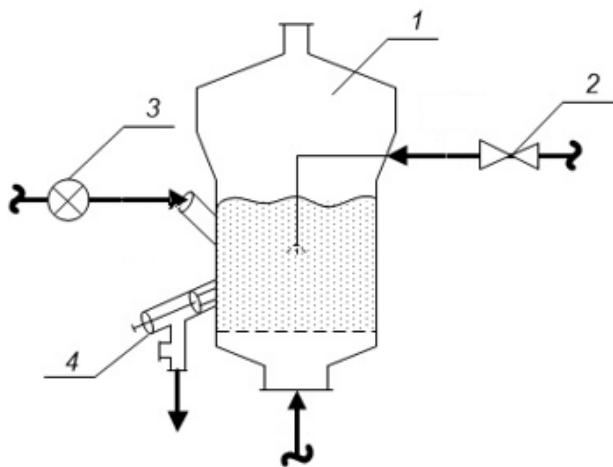


Рис. 1. Апарат для гранулювання термолабільних речовин в псевдозрідженому шарі: 1 – гранулятор, 2 – пристрій для введення вихідного розчину, 3 – пристрій для введення частинок; 4 – пристрій для вивантаження готової продукції

Через об'ємне змішування гранул псевдозріджений шар часто вважається повністю змішаним. Розчин розпилюється у верхній частині шару, а біля поверхні утворюється «активна» зона, де краплі осідають на гранулах і розчинник випаровується. Розподіл температури повітря, вимірний на обладнанні з псевдозрідженим шаром з верхнім розпиленням рідини за допомогою форсунки, показує наявність трьох областей у псевдозрідженому шарі. Виділяють наступні зони: зона змочування – біля розпилювального сопла у верхній частині шару, ізотермічна зона – біля стінок гранулятора і зона теплообміну – над розподільником гарячого повітря.

Гранулятор із псевдозрідженим шаром розглядається як два реактори, які обмінюються частинками (рис. 2).

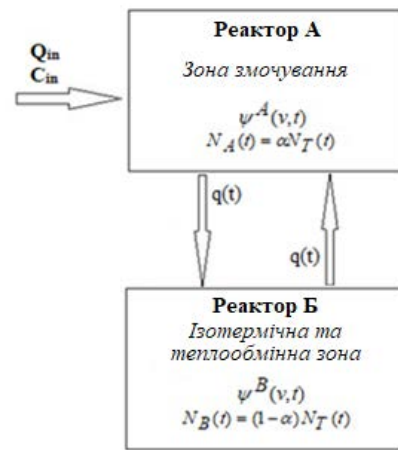


Рис. 2. Модель реактора

Реактор А відповідає зоні зволоження, а реактор Б – ізотермічній і теплообмінній зонам. Застосування рівняння балансу популяції до реакторів А і Б призвело до системи рівнянь (1):

$$\begin{cases} \frac{d\psi^A(v,t)}{dt} = \frac{q(t)}{V_A} \cdot [\psi^B(v,t) - \psi^A(v,t)] - \frac{\partial}{\partial v} \left[\frac{dv}{dt} \cdot \psi^A(v,t) \right] + F(v) - E(v) \\ \frac{d\psi^B(v,t)}{dt} = \frac{q(t)}{V_B} \cdot [\psi^A(v,t) - \psi^B(v,t)] \end{cases} \quad (1)$$

Перший і другий доданки в (1) відповідають обміну частинками між реакторами А і Б і зростанню шарів. В результаті дослідження математичної моделі була отримана система диференціальних рівнянь, що описують процес грануляції в псевдозрідженому шарі:

$$\begin{cases} \frac{d\Phi_i^A}{dt} = \frac{q(t)}{V_A} \cdot (\Phi_i^B - \Phi_i^A) + D_i(t) + \sum_{j,k \in X}^{j \leq k} (1 - \frac{1}{2} \cdot \delta_{j,k}) \eta(v) \beta_{j,k} \cdot \Phi_j^A \cdot \Phi_k^A - \Phi_i^A \cdot \sum_{k=1}^N \beta_{j,k} \cdot \Phi_k^A - S \eta K_i \Phi_i^A \\ \frac{d\Phi_i^B}{dt} = \frac{q(t)}{V_B} \cdot (\Phi_i^A - \Phi_i^B) \end{cases} \quad (2)$$

де Φ_i^A – функція розподілу гранул в реакторі А; Φ_i^B – функція розподілу гранул в реакторі Б;

V_A – об’єм реактора А; V_B – об’єм реактора Б; $q(t)$ – швидкість обмінного потоку між реакторами А і Б; $D_i(t)$ – термін зростання дискретного нашарування; $\beta_{j,k}$ – функція агломерації; chi – частка, що належить до класу i ; i – клас крупності гранул; v – об’єм частинки; $[v_i; v_{i+1}]$ діапазон, де зосереджені гранули певного класу розміру.

Параметри κ і γ пов’язані з формою гранулометричного складу, а β_0 , який описує кінетику зміни гранулометричного складу, залежить від умов експлуатації.

Система управління процесом гранулювання мінеральних добрив з MPC регулятором

У принципах систем розширеного управління технологічними процесами основою управління є так зване управління на основі прогнозованої моделі (Model Predictive Control). Цей підхід почав розвиватися на початку 60-х років для управління процесами та обладнанням у нафтохімічному та енергетичному виробництві, для яких використання традиційних методів синтезу було надзвичайно складним через виняткову складність математичних моделей.

Алгоритм управління з прогнозованою моделлю можна представити у такому вигляді:

- Вимір поточного стану $\hat{x}[k]$, де k – поточний час.
- Знаходження послідовності оптимальних контрольних значень $u[i]$ для контрольного горизонту $N_c = k + C$, $k \leq N_c$, по всьому горизонту прогнозування $N_p = k + P$, яка мінімізує цільову функцію.
- Застосування лише першого контрольного значення $u[1]$ для управління, решта відкидається.
- Перехід до кроку 1 і повтор процедури в момент часу $k+1$.

У більшості випадків управління на основі MPC використовується для вирішення оптимальних завдань управління на верхньому рівні автоматизації, в системі виконання виробництва, без участі пристроїв управління нижнього рівня. Це пов’язано з тим, що обчислювальна потужність не має достатньої швидкості та об’єму пам’яті для обробки та зберігання інформації під час роботи алгоритму. Це твердження було вірно для програмованих логічних контролерів минулого століття, але сучасні пристрої забезпечені досить продуктивними процесорами і обсягами пам’яті. Завдяки цьому стає можливим застосовувати принципи управління з прогнозованою моделлю на нижчому рівні та здійснювати оперативний контроль в режимі реального часу в оптимальних режимах. У цьому випадку структуру регулятора MPC можна представити так (рис. 3).

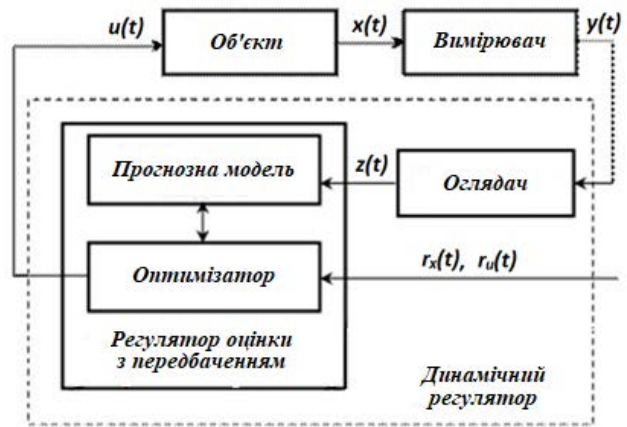


Рис. 3. Структура регулятора MPC

За аналогією з ПІД-регулятором регулятор MPC може працювати за схемою «один вхід – один вихід» (SISO).

Відповідно до наведеного алгоритму основними налаштуваннями регулятора будуть:

- N_p – горизонт прогнозу.
- N_c – горизонт управління.
- T_t – час одного циклу перерахунку алгоритму та знаходження оптимальних значень управління, тобто час, протягом якого буде виконуватися алгоритм регулятора.

При використанні MPC регулятора необхідно враховувати різні обмеження. У наведеному вище алгоритмі вибір горизонту прогнозу впливає на час розрахунку послідовності керуючих впливів разом із чисельними алгоритмами оптимізації. Занадто далекий прогноз і складність обчислення оптимальних значень призводять до збільшення обчислень на кожному такті і можуть вимагати багато часу ЦП.

Кожен параметр N_p , N_c , T_t впливає на якість регулювання, швидкість розрахунку оптимальних управлінь і чутливість системи управління. Критеріями вибору є мінімізація квадратичної похибки та розрахункова швидкість пошуку оптимального варіанту управління. За інших рівних умов перевагу слід віддавати комбінаціям параметрів з найменшим часом обчислення алгоритму.

Розглянемо контрольне завдання з лінійною моделлю та квадратичним функціоналом. Нехай об’єкт управління описується лінійною системою диференціальних рівнянь виду:

$$\dot{x}' = Ax + Bu \tag{3}$$

$$y = Cx + Du \tag{4}$$

У (3) A – матриця розмірності $n \times n$, B – матриця розмірності $n \times m$, C – матриця розмірності $r \times n$.

Для того, щоб оцінити якість процесів управління, необхідно ввести квадратичний функціонал:

$$J = \int_0^{\infty} (y^T R y + \lambda^2 u^T Q u) dt \tag{5}$$

У (5) y_i і u_i є функціями t , $R \in r \times r$ і $Q \in m \times m$ позитивно визначеними симетричними квадратними матрицями; λ – постійний позитивний коефіцієнт.

Реалізація системи управління процесом гранулювання мінеральних добрив в пакеті MATLAB

На сьогодні математичне моделювання за допомогою програмних засобів набуло належної популярності та інтенсивно розвивається як передовий науковий напрямок на стику математики та інформатики. Серед ряду сучасних систем комп'ютерної математики виділяється математична система MATLAB. Її матрична орієнтація та пакет розширення Simulink сприяють популярності цієї системи. Вони надають зручні та прості інструменти, включаючи візуальне та об'єктно-орієнтоване програмування для моделювання лінійних і нелінійних динамічних систем, а також багато інших системних пакетів. Структура MATLAB, крім основи – системи MATLAB + Simulink, містить великі групи пакетів прикладних програм.

Для отримання передатної функції моделі було вирішено використовувати розширення System Identification. Пакет System Identification Toolbox системи MATLAB містить інструменти для створення математичних моделей лінійних динамічних об'єктів на основі спостережуваних вхідних і вихідних даних. Він має зручний графічний інтерфейс, який дозволяє впорядковувати дані та створювати моделі.

Так, за результатами роботи System Identification Toolbox в системі MATLAB сформовано таку передаточну функцію моделі:

$$W = \frac{-0.09715s + 0.2277}{s^2 + 0.2636s + 0.1069} \quad (6)$$

Щоб створити реальні чи складні моделі простору станів або перетворити моделі динамічної системи у форму моделі простору станів, необхідно використати команду ss у пакеті Control System Toolbox.

Модель простору станів – це математичне представлення фізичної системи як набору вхідів, виходів і змінних стану, пов'язаних диференціальними рівняннями першого порядку. Змінні стану визначають значення вихідних змінних. Об'єкт моделі ss може представляти моделі простору стану SISO або MIMO в безперервному або дискретному часі.

Для цього ми ініціалізуємо функцію передачі в MATLAB і викликаємо відповідну команду для обчислення матриць A , B , C і D , які використовуються в (3) і (4).

Для отримання графіка перехідної характеристики з MPC регулятором використовувався пакет

MPC Designer системи MATLAB. При експорті цієї перехідної характеристики в пакет Simulink отримано графік роботи гранулятора з MPC регулятором (позначено синім кольором) і без нього (позначено жовтим кольором):

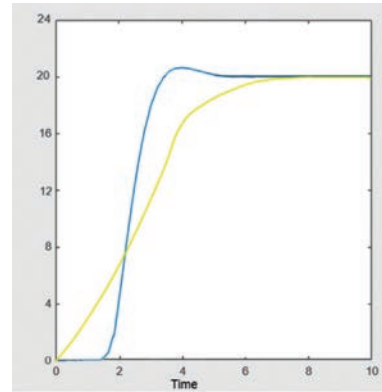


Рис. 4. Графік з використанням контролера MPC

З цього рисунку видно, що з MPC регулятором система працює швидше, тому цей регулятор можна використовувати в системі управління виробництвом мінеральних добрив.

Висновки. Розроблено систему управління виробництвом мінеральних добрив у грануляторі з псевдозрідженим шаром з MPC регулятором. Для створення системи управління використано математичну модель балансу популяції гранул у різних зонах гранулятора. Визначено передавальну функцію і на її основі оцінено створену систему за допомогою MPC регулятора. Впровадження системи управління з MPC регулятором дозволило значно скоротити (за 5,5 с замість 8 с) час виходу гранулятора з псевдозрідженим шаром до заданого рівня гранулометричного складу Φ_d .

Основною перевагою підходу MPC, що зумовлює його успішне використання в практиці побудови та експлуатації систем управління, є відносна простота базової схеми формування зворотного зв'язку в поєднанні з високими адаптивними властивостями. Остання обставина дозволяє управляти об'єктами зі складною структурою, що включають нелінійності, оптимізувати процеси в режимі реального часу в межах керуючих і керованих змінних, враховувати невизначеності завдання об'єктів і збурення. Крім того, можливе врахування транспортної затримки, враховуючи зміну критерію якості під час процесу та відмови датчиків вимірювальної системи.

Для створення системи також використовуються пакети програмного забезпечення MatLab Simulink, MPC Designer і System Identification Toolbox.

Список літератури:

1. Lipsanen T., Närvänen T., Räikkönen H., Antikainen O., Yliruusi J. Particle size, moisture, and fluidization variations described by indirect in-line physical measurements of fluid bed granulation. *AAPS PharmSciTech*. 2008. № 9. 2008. Pp. 1070-1077.
2. Lipsanen T. Process analytical technology approach on fluid bed granulation and drying. Identifying Critical Relationships and Constructing the Design Space. *Faculty of Pharmacy of the University of Helsinki*. Finland, 2008, 51p.
3. Silva C.A.M., Parise M.R., Silva F.V., Taranto O.P. Control of fluidized bed coating particles using Gaussian spectral pressure distribution. *Powder Technology*. 2011. № 212. Pp. 445-458.
4. el Mafadi S., Hayert M., Poncelet D. Fluidization control in Wuster coating process. *Hemijska Industrija*. 2003. №57. Pp. 641-644.
5. Poncelet D., Prata A.S., el Mafadi S., Boilleraux L. Optimisation and process control of fluid bed coating. *17th International Conference on Bioencapsulation*. Groningen, Netherlands, September 24-26, 2009.
6. Maudhuit A., Boillereaux L., el Mafadi S., Poncelet D. Development of process-control for coating in fluid bed. *18th International Conference on Bioencapsulation*, Porto, Portugal, October 1-2, 2010.
7. Terashita K., Watano S., Miyanami K. Determination of end-point by frequency analysis of power consumption in agitation granulation. *Chemical and Pharmaceutical Bulletin*. 1990. № 38. Pp. 3120-3123.
8. Watano S., Tanaka T., Miyanami K. A method for process monitoring and determination of operational end-point of consumption in agitation granulation. *Advanced Powder Technology*. 1995. № 6. Pp. 91-102.
9. Watano S., Takashima H., Miyanami K. Scale-up of agitation fluidized bed granulation by neural network. *Chemical and Pharmaceutical Bulletin*. 1997. №45. Pp. 1193-1197.
10. Nieuwmeyer F.J.S., Damen M., Gerich A., Rusmini F., van der K., Maarschalk V., Vromans H. Granule characterization during fluid bed drying by development of a near infrared method to determine water content and median granule size. *Pharmaceutical Research*. 2007. № 24. Pp. 1854-1861.
11. Burggraef A., van den Kerkhof T., Hellings M., Remon J.P., Vervaeke C., de Beer T. Evaluation of in-line spatial filter velocimetry as PAT monitoring tool for particle growth during fluid bed granulation. *European Journal of Pharmaceutics and Biopharmaceutics*. 2010. № 76. Pp. 138-146.
12. Huang J., Goolcharran C., Utz J., Hernandez-abad P., Ghosh K., Nagi A. A PAT Approach to enhance process understanding of fluid bed granulation using inline particle size characterization and multivariate analysis. *Journal Pharmaceutical Innovation*. 2010. № 5. Pp. 58-68.
13. Korniyenko B., Ladieva L., Galata L. Control system for the production of mineral fertilizers in a granulator with a fluidized bed. *ATIT 2020 – Proceedings: 2020 2nd IEEE International Conference on Advanced Trends in Information Theory*. 2020. № 9349344. Pp. 307-310.
14. Корнієнко Б.Я. Інформаційні технології оптимального управління виробництвом мінеральних добрив. Київ. 2014. 288 с.
15. Korniyenko B.Y. The two phase model of formation of mineral fertilizers in the fluidized-bed granulator. *The Advanced Science Journal*. 2013. № 4. Pp. 41-44.
16. Корнієнко Б.Я. Двохфазна модель процесу зневоднення та гранулювання у псевдозрідженому шарі. *Вісник Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут», Серія «Хімічна інженерія, екологія та ресурсозбереження»*. 2012. № 2(10). С. 31-35.
17. Корнієнко Б.Я. Математичне моделювання динаміки процесів переносу при зневодненні та гранулюванні у псевдозрідженому шарі. *Науковий журнал «Вісник Національного авіаційного університету»*. 2012. № 4(53). С. 84-90.
18. Korniyenko B.Y. Modeling of transport processes in disperse systems. *The Advanced Science Journal*. 2013. № 1. Pp. 7-10.
19. Корнієнко Б.Я. Мінеральні добрива. Двохфазна модель утворення в грануляторі із псевдозрідженим шаром. *Хімічна промисловість України*. 2013. № 1. С. 39-43.
20. Корнієнко Б.Я., Ладієва Л.Р., Снігур О.В. Гранулювання у псевдозрідженому шарі. Дослідження детермінованого хаосу процесу. *Хімічна промисловість України*. 2013. № 2. С. 20-23.
21. Korniyenko B.Y. Research modes of a fluidized bed granulator. *The Advanced Science Journal*. 2013. № 5. Pp. 12-15.
22. Корнієнко Б.Я. Ідентифікація процесу гранулювання мінеральних добрив у апараті з псевдозрідженим шаром. *Наукоємні технології*. 2013. № 3(19). С. 280-284.
23. Korniyenko B.Y., Osipa L. Identification of the granulation process in the fluidized bed. *ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences*. 2018. № 13(14). Pp. 4365-4370.
24. Korniyenko B., Ladieva L. Mathematical Modeling Dynamics of the Process Dehydration and Granulation in the Fluidized Bed. *Advances in Intelligent Systems and Computing. 1247 AISC*. 2021. Pp. 18-30.

25. Korniyenko B., Ladieva L., Galata L. Control system for the production of mineral fertilizers in a granulator with a fluidized bed. *2020 2nd IEEE International Conference on Advanced Trends in Information Theory*. 2020. № 9349344. Pp. 307-310.
26. Korniyenko B.Y., Borzenkova S.V., Ladieva L.R. Research of three-phase mathematical model of dehydration and granulation process in the fluidized bed. *ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences*. 2019. № 14(12). Pp. 2329-2332.
27. Korniyenko B.Y., Ladieva L.R. Mathematical modeling dynamics of the process dehydration and granulation in the fluidized bed. *Інтелектуальні системи прийняття рішень і проблеми обчислювального інтелекту*. Херсон. 2019. Pp. 86-88.
28. Корнієнко Б.Я. Мінеральні добрива. Оптимізація процесу зневоднення та гранулювання у псевдозрідженому шарі. *Хімічна промисловість України*. 2013. № 4. С. 69-73.
29. Korniyenko B.Y. Static and dynamic characteristics of transport processes in disperse systems. *Наукоємні технології*. 2013. № 2(18). Pp. 166-170.
30. Корнієнко Б.Я. Мінеральні добрива. Статична оптимізація процесу гранулювання у псевдозрідженому шарі. *Хімічна промисловість України*. 2013. № 5. С. 36-40.
31. Корнієнко Б.Я. Ідентифікація процесу гранулювання мінеральних добрив у апараті з псевдозрідженим шаром. *Наукоємні технології*. 2013. № 3(19). С. 280-284.
32. Корнієнко Б.Я. Задачі оптимізації зневоднення та гранулювання мінеральних добрив у псевдозрідженому шарі. *Вісник Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут», Серія «Хімічна інженерія, екологія та ресурсозбереження»*. 2014. № 1(12). С. 28-31.
33. Korniyenko Y.M., Liubeka A.M., Sachok R.V., Korniyenko B.Y. Modeling of heat exchangement in fluidized bed with mechanical liquid distribution. *ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences*. 2019. № 14(12). Pp. 2203-2210.
34. Korniyenko B., Galata L., Ladieva L. Security Estimation of the Simulation Polygon for the Protection of Critical Information Resources. *CEUR Workshop Proceedings, Selected Papers of the XVIII International Scientific and Practical Conference "Information Technologies and Security" (ITS 2018)*. Kyiv, Ukraine. 2018. № 2318. Pp. 176-187.
35. Корнієнко Б.Я. Дослідження моделі взаємодії відкритих систем з погляду інформаційної безпеки. *Наукоємні технології*. 2012. № 3(15). С. 83-89.
36. Korniyenko B., Yudin O., Novizkij E. Open systems interconnection model investigation from the viewpoint of information security. *The Advanced Science Journal*. 2013. № 8. Pp. 53-56.
37. Zhulynskiy A.A., Ladieva L.R., Korniyenko B.Y. Parametric identification of the process of contact membrane distillation. *ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences Volume 14*. 2019. № 17. Pp. 3108-3112.
38. Bieliatynskiy A., Osipa L., Korniyenko B. Water-saving processes control of an airport. *Paper presented at the MATEC Web of Conferences*. 2018. № 239.
39. Корнієнко Б. Я., Юдін О. К., Снігур О. С. Безпека аутентифікації у web-ресурсах. *Захист інформації*. 2012. № 1 (54). С. 20-25. doi.org/10.18372/2410-7840.14.2056 (ukr)
40. Корнієнко Б. Я., Галата Л. П. Дослідження імітаційного полігону захисту критичних інформаційних ресурсів методом IRISK. *Модельовання та інформаційні технології*. 2018. №83. С. 34-41.
41. Корнієнко Б. Я., Галата Л. П. Побудова та тестування імітаційного полігону захисту критичних інформаційних ресурсів. *Наукоємні технології*. 2017. № 4 (36). С. 316-322. doi.org/10.18372/2310-5461.36.12229.
42. Korniyenko Y.M., Haidai S.S., Sachok R.V., Liubeka A.M., Korniyenko B.Y. Increasing of the heat and mass transfer processes efficiency with the application of non-uniform fluidization. *ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences*. 2020. № 15(7). Pp. 890-900.
43. Korniyenko B., Korniyenko Y., Haidai S., Liubeka A., Huliienko S. Conditions of Non-uniform Fluidization in an Autooscillating Mode. *Advances in Computer Science for Engineering and Manufacturing. ISEM 2021. Lecture Notes in Networks and Systems*. 2022. № 463. Pp. 14-27.
44. Korniyenko B., Korniyenko Y., Haidai S., Liubeka A. The Heat Exchange in the Process of Granulation with Non-uniform Fluidization. *Advances in Computer Science for Engineering and Manufacturing. ISEM 2021. Lecture Notes in Networks and Systems*. 2022. № 463. Pp. 28-37

Korniyenko B.Ya., Nesteruk A.O. CONTROL SYSTEM FOR THE PRODUCTION OF GRANULAR MINERAL FERTILIZERS IN A FLUIDIZED BED

A systematic analysis of approaches to the construction of a control system for the production of granular mineral fertilizers in a fluidized bed was carried out. The work aims to develop an optimal control system to ensure efficient and stable production of granular fertilizers in a complex fluidized bed environment. In the

course of the research, the main technological parameter affecting the quality and productivity of the mineral fertilizer manufacturing process was determined - particle size. It depends on the properties of the substances used, the process mode and other factors, including the nature of the interaction between the phases of the granulation process in the fluidized bed. A mathematical model of population balance in different zones of the granulator was used to build the control system. This model made it possible to take into account the dynamics of particles and their interaction in a fluidized medium. The main component of the developed control system is the MPC (Model Predictive Control) controller. MPC uses a mathematical process model to predict the future state of the system and make optimal control decisions. This controller was chosen because of its ability to adapt to the changing conditions of nonlinear systems and to account for control quantity limitations. In addition, the transfer function of the system was determined based on the model, which made it possible to evaluate the efficiency of the developed system using the MPC regulator. The software packages MatLab Simulink, MPC Designer and System Identification Toolbox are used to create the system. This work opens up possibilities for improving the process of production of granular mineral fertilizers in complex conditions of a fluidized environment, namely, quality control of the final product - granular mineral fertilizers, and may be useful for industrial enterprises engaged in the production of granular fertilizers and related products.

Key words: control system, mathematical model, granulation, fluidized bed, mineral fertilizers.

Коростельов А.С.

Кременчуцький національний університет імені Михайла Остроградського

Гученко М.І.

Кременчуцький національний університет імені Михайла Остроградського

Перекрест А.Л.

Кременчуцький національний університет імені Михайла Остроградського

Самойлов А.М.

Кременчуцький національний університет імені Михайла Остроградського

Вадурін К.О.

Кременчуцький національний університет імені Михайла Остроградського

АНАЛІТИЧНІ РОЗРАХУНКИ КОРПОРАТИВНОЇ МЕРЕЖІ БАЗОВАНОЇ НА ТЕХНОЛОГІЯХ ІНТЕРНЕТУ РЕЧЕЙ ПІДПРИЄМСТВА З ЕКОЛОГІЧНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ

Наразі у світі вкрай гостро постає проблема підтримання стабільного рівня чистоти атмосферного повітря, зважаючи на високий рівень урбанізації, збільшення числа підприємств з атмосферними викидами та збільшення кількості особистого автотранспорту. У той же час, в Україні у зв'язку з війною та знищенням Каховської ГЕС відбувається значні незворотні зміни: міліє Каховське водосховище; переміщуються підприємства; відбувається внутрішня міграція населення; зменшується кількість каналів для зрошення полів у південній частині України. При цьому збільшується навантаження на організації з екологічних досліджень, адже необхідно аналізувати поточний стан атмосферного повітря, за умов релокації виробничих підприємств та населення з інших областей, що викликають зміни у щільності та інтенсивності викидів, які були виявлені, статистично зафіксовані, та прогнозовані до початку війни та Каховської екологічної катастрофи. Щоб автоматизувати частину рутинних завдань з екологічних досліджень, забезпечити апаратно-мережеве підґрунтя для реалізації актуальних інформаційних систем для аналізу екологічних даних актуальною задачею є розрахунок корпоративної мережі базованої на технологіях інтернету речей підприємства з екологічних досліджень. У даній роботі використано методи та алгоритми, що дозволяють провести розрахунки проєктованої мережі, та обрати оптимальні рішення для її реалізації. Робота включає моделювання різних сценаріїв використання мережі та розрахунок необхідних ресурсів для підтримки функціональних вимог підприємства.

Метою роботи є розрахунок та проєктування, корпоративної мережі підприємства з екологічних досліджень з підтримкою технологій Інтернету речей, що у майбутньому дозволить автоматизувати завдання з отримання, обробки та запису екологічних показників у базу даних підприємства для подальшого напівавтоматичного формування звітності.

Об'єктом дослідження є корпоративна мережа.

Предметом дослідження є корпоративна мережа базована на технологіях Інтернету речей підприємства з екологічних досліджень.

Методологією у роботі є застосування: підходів до проєктування мереж виходячи з рекомендацій до архітектури мереж Інтернету речей та Industry 4.0; методів аналітичних розрахунків широкосмугових пропускових ліній; математичного моделювання передачі даних мережами.

У ході роботи проведено аналіз вимог та потреб підприємства, розроблено математичні моделі, реалізовано алгоритми та здійснено розрахунки, що дозволили побудувати оптимальну корпоративну мережу з використанням технологій Інтернету речей для підприємства з екологічних досліджень.

Наукова новизна роботи полягає у тому, що уперше розроблено аналітичну модель корпоративної мережі підприємства екологічних досліджень, що, на відміну від інших, розроблена з застосуванням рекомендацій до архітектури мереж Інтернету речей та методів для забезпечення оптимальних показників швидкості обміну інформацією та безпеки.

Практична значимість роботи полягає у розробці аналітичної моделі комп'ютерної мережі підприємства з екологічних досліджень. За результатами моделювання аналітичної моделі буде прийнято рішення про фізичну реалізацію розробки на підприємстві. Якщо мережа буде прийнята до реалізації та створена фізично, на її основі буде розгорнуто проєктовану програмну інформаційну систему для прогнозування екологічних показників.

Ключові слова: LAN, комп'ютерна мережа, TCP/IP, Wi-Fi, Ethernet, аналітичні розрахунки, IoT.

Постановка проблеми. В світі нині серйозно стоїть проблема забезпечення чистого повітря внаслідок високої урбанізації, збільшення кількості підприємств з викидами та зростанням автотранспорту. В Україні також спостерігаються значні незворотні зміни через війну та зруйнування Каховської ГЕС: обміління Каховського водосховища, переміщення підприємств, внутрішня міграція населення та скорочення зрошувальних каналів у південній частині країни. Це створює додаткове навантаження на екологічні дослідницькі організації, оскільки потрібно аналізувати поточний стан повітря з урахуванням перенесення виробництва та переселення населення з інших регіонів, що змінюють щільність та інтенсивність викидів, що були зафіксовані, вивчені та прогнозовані до початку конфлікту та екологічної катастрофи. Для автоматизації рутинних завдань екологічних досліджень, створення апаратно-мережевої основи для реалізації інформаційних систем обробки та аналізу екологічних даних стає актуальною задачею розрахунок та проєктування корпоративної мережі, що базується на технологіях Інтернету речей для підприємств, які займаються екологічними дослідженнями.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Хоча мережі широко використовуються для усіх сучасних задач обміну інформацією, на даний час у наукометричних базах мало актуальних наукових праць пов'язаних з проєктуванням мереж на базі технології Інтернету речей.

Подібним дослідженням є праця з темою «Розробка комп'ютерної системи електронного архівування для Департаменту охорони здоров'я Ніневії» [1]. У дослідженні автори ставлять за мету розробку електронної системи архівування на основі комп'ютерної мережі для організаційного використання. Проаналізована робота схожа за змістом на роботу що проводиться, адже наразі основна частина документообігу в екологічних установах відбувається за допомогою паперових носіїв. Реалізація системи передбачає перетворення паперових документів і додатків в електронний формат та зберігання їх у базі даних з індексацією за номером документа або книги. Система надає засоби для управління поштою, робочим процесом, підготовки звітів, а також гнучкість

у керуванні базою даних системи (резервне копіювання, оновлення адміністративних одиниць відповідно до структури організації).

Дослідження показало, що електронна система архівування має позитивний вплив на адміністративну роботу, спрощуючи процес архівування та зберігання документів і офіційної кореспонденції, що дозволяє звільнити простір, зайнятий паперовими файлами. Вона також зменшує час і зусилля, витрачені на пошук файлів, і сприяє зручному обміну документами за допомогою локальної мережі. Дослідження також ставить за мету підвищення ролі архівування у запуску проєкту електронного уряду шляхом поліпшення та спрощення процедур офіційних транзакцій. Дане рішення не може бути повністю використане для реалізації мережі підприємства з екологічного моніторингу, адже не передбачено використання окремих серверів для автоматичного збирання та зберігання даних з станцій моніторингу повітря, також не передбачено апаратних потужностей для проведення розрахунків та прогнозування змін екології досліджуваного середовища.

Близькою за підходом до проєктування є розробка з темою «Проєктування комп'ютерної мережі Олександрівської ЗШ I-III ступенів № 1 Олександрівської районної адміністрації Кіровоградської області» [2].

Як зазначає автор, у першому розділі розглянуто загальні принципи побудови локальної мережі, одногранні та ієрархічні структури, надано базову характеристику технологіям ЛОМ, проведено огляд наявного мережевого обладнання, розглянуто типи з'єднань ліній і виконано опис мережевих операційних систем. У другому розділі роботи описано програмно-апаратний комплекс «корпоративної» локальної мережі та надано рекомендації з планування інформаційної безпеки, кількості необхідного обладнання, проведення налаштування обладнання, для її реалізації.

Однак спроектована мережа не передбачає наявності серверів для зберігання та опарювання даних від зовнішніх станцій екологічних досліджень, інформаційної системи для формування автоматичної звітності.

У статті «Побудова гетерогенної мережі підприємства з підтримкою QoS/QoE якості доставки

інформації» [3] досліджуються підходи до побудови гетерогенної мережі підприємства, яка може підтримувати якість послуг QoS та суб'єктивну оцінку QoE для загального трафіку мережі та мультимедійного сервісу відео- та аудіо- з мінімізацією негативних факторів.

У дослідженні наведено опис підходу до побудови мережі підприємства що базуються на аналізі стандартів, що дозволяє обрати OSS/BSS та TMN з точки зору забезпечення якості мережі з початку її побудови. Підхід, запропонований у роботі, включає розгляд параметрів, що являють собою параметри якості обслуговування QoS на прикладному, мережевому та фізичному рівнях ISO/OSI. Надійність передачі пакетів залежить від пропускної спроможності, затримки, тремтіння, втрати даних, доступності послуги, безпеки, зони покриття та часу встановлення з'єднання. На відміну від QoS показника, QoE не технічний та вимірює ступінь позитивного чи негативного досвіду користування як залишкову якість після спотворення контенту гетерогенною мережею до кінцевого користувача.

Вищеназвані фактори впливу змінюють акцент управління гетерогенною мережею підприємства в бік продуктивності. Результати показують, що якість передачі мультимедіа трафіку визначається втратою мережевих пакетів, тремтінням та затримкою пакета, затримкою з'єднання.

Переваги побудови гетерогенної мережі підприємства з підтримкою QoS/QoE якості доставки інформації наступні:

1. Покращена якість обслуговування для всіх типів трафіку, включаючи відео, аудіо та голосовий.

2. Зменшена затримка та тремтіння для мультимедіа трафіку.

3. Покращена продуктивність та надійність мережі.

4. Зручніша та ефективніша адміністрування та обслуговування мережі.

5. Покращена суб'єктивна оцінка якості обслуговування кінцевими користувачами.

Недоліки побудови гетерогенної мережі підприємства з підтримкою QoS/QoE якості доставки інформації:

1. Більш складна та дорожча мережа.

2. Більше вимог до обладнання та програмного забезпечення.

3. Більш складне адміністрування та обслуговування мережі.

4. Необхідність більш висококваліфікованого персоналу для управління мережею.

Загалом, переваги побудови гетерогенної мережі підприємства з підтримкою QoS/QoE якості доставки інформації переважають недоліки. Гетерогенні мережі пропонують низку переваг у порівнянні з традиційними мережами, включаючи покращену якість обслуговування, продуктивність та надійність. Що буде враховано при подальшому проектуванні мережі підприємства з екологічних досліджень.

Дослідження описане в статті «Алгоритмічне забезпечення для планування інформаційно-комунікаційної мережі підприємства на базі технологій 5G» [4] має цінну інформацію для розгляду перспектив впровадження 5G у мережу підприємства з екологічних досліджень.

По-перше, дослідження допоможе покращити ефективність мережі Інтернету речей для екологічних підприємств. 5G мережі пропонують ширшу смугу пропускання та нижчу затримку, ніж попередні технології мережі, що може дозволити підприємствам збирати та обробляти більше даних з IoT пристроїв.

По-друге, дослідження допоможе покращити безпеку мережі Інтернету речей. 5G мережі пропонують нові функції безпеки, такі як шифрування та аутентифікація, що можуть захистити IoT пристрої від злому. Це допоможе екологічним підприємствам захистити їхні дані та активи від несанкціонованого доступу.

По-третє, дослідження допоможе знизити витрати на мережу Інтернету речей. 5G мережі є більш ефективними, ніж попередні технології мереж, що дозволить підприємствам заощадити гроші на витратах для реалізації мережі. Це допоможе підприємствам виділити більше коштів на інші важливі цілі, такі як аналіз та прогнозування екологічного стану досліджуваного регіону.

Однак, також є деякі недоліки дослідження описаного в статті.

По-перше, дослідження фокусується на плануванні 5G мереж для підприємств, а не на специфічних потребах підприємств з екологічних досліджень. Це означає, що результати дослідження цілком не можуть бути безпосередньо застосовуваними до підприємств з екологічних досліджень.

По-друге, дослідження є теоретичним, і не включає практичне впровадження 5G мережі для підприємства з екологічних досліджень.

Дослідження описане в статті «Комп'ютерна інженерія в страхових компаніях» [5] містить корисну інформацію для розробки мережі екологічного підприємства.

По-перше, застосування комп'ютерної інженерії в страхових компаніях допоможе покращити розу-

міння того, як використовувати комп'ютерні технології для покращення ефективності та продуктивності екологічних підприємств за аналогіями зі страховими.

По-друге, у дослідженні наведено опис можливостей використання комп'ютерних технологій для покращення обслуговування клієнтів.

По-третє, у дослідженні описано комп'ютерні технології для покращення ризик-менеджменту, що дозволяє розглянути можливість використання таких підходів для менеджменту підприємств з екологічних досліджень.

Однак у статті є деякі недоліки у розрізі розробки мережі для екологічного підприємства.

По-перше, дослідження фокусується на страхових компаніях, а не на підприємствах з екологічних досліджень. Це означає, що результати дослідження безпосередньо не стосуються підприємств з екологічних досліджень, хоча дозволяють розглянути застосовність представлених підходів для рішення поставленої задачі.

По-друге, дослідження є теоретичним, і не включає практичне впровадження комп'ютерних технологій у страхових компаніях. Це означає, що деякі результати дослідження можуть не відповідати реальній реалізації.

Теоретична база дослідження враховує проаналізовані наукові підходи до проектування комп'ютерних мереж, та за основу розробки мережі підприємства з екологічних досліджень також взято видання у яких описані комп'ютерні мережі та засади для їх розробки.

Основою для проектування програмної частини інформаційної системи стала монографія [6]. У даній монографії висвітлено розробку ефективних критеріїв, методів та моделей для керування буровибуховими роботами з використанням комп'ютерної підтримки рішень.

Оскільки у монографії висвітлено застосування методів теорії прийняття рішень, машинного навчання та паралельних обчислень у керуванні та оптимізації складних систем, робота є оптимальною за набором підходів для її інтерпретації для подальшої розробки інформаційної моніторингової екологічної системи, що функціонуватиме на спроектованій апаратній мережній частині.

Базою для проектування апаратної частини локальної мережі підприємства з екологічних досліджень є праці [7, 8], у яких висвітлено основні напрямки комп'ютерингу у тому числі проектування, розробку та моделювання комп'ютерних мереж різних призначень та типів.

Основою для подальшого моделювання спроектованої мережі у віртуальному середовищі

Cisco використано методику викладено у матеріалах [9]. У даному посібнику розглянуто базові принципи організації, підключення, функціонування та моніторингу технології Інтернету речей за допомогою середовища моделювання Cisco Packet Tracer, а також методи захисту сервісів Інтернету речей. Подано теоретичні відомості про екосистему Розумного будинку, методичні вказівки щодо фізичних об'єктів або речей, які можуть з'єднуватись через мережу в середовищі Cisco Packet Tracer.

Метою статті є розрахунок та проектування, корпоративної мережі підприємства з екологічних досліджень з підтримкою технологій Інтернету речей, що у майбутньому дозволить автоматизувати завдання з отримання, обробки та запису екологічних показників у базу даних підприємства для подальшого напів-автоматичного формування звітності.

Виклад основного матеріалу. Методологією у роботі є застосування: підходів до проектування мереж виходячи з рекомендацій до архітектури мереж Інтернету речей та Industry 4.0; методів аналітичних розрахунків широкосмугових пропускних ліній; математичного моделювання передачі даних мережами.

Об'єктом дослідження є корпоративна мережа.

Предметом дослідження є корпоративна мережа базована на технологіях Інтернету речей підприємства з екологічних досліджень.

Проведені аналітичні розрахунки дозволяють ефективно використати наявні ресурси підприємства, включаючи обладнання, персонал та мережеву інфраструктуру. Це допоможе знизити витрати і покращити продуктивність. Також, аналітичні розрахунки надають керівництву підприємства обґрунтовані дані та інсайди для прийняття рішень.

Для побудови мережі підприємства спершу проведено аналіз потреб кожного відділу підприємства в комп'ютеризованих робочих місцях враховуючи площу кабінетів. Визначено яке обладнання необхідне, його кількість та площу приміщення. Обирано топологію комп'ютерної мережі, тобто який буде спосіб з'єднання мережевих пристроїв, далі вибрано середовище передачі даних. Обираючи кабель враховано його переваги та недоліки, щоб запобігти збоїв комп'ютерної мережі. Після проведено огляд мережевих протоколів, необхідних для функціонування комп'ютерної мережі та передачі даних по ній. Стандарти Ethernet визначають дрютяні з'єднання і електричні сигнали на фізичному

рівні, формат пакетів і протоколи управління доступом до середовища – на каналному рівні моделі OSI. Для коректної роботи мережі використано мережеве обладнання, щоб розбити одну мережу на кілька підмереж. Також при побудові мережі передбачено додаткову функцію у вигляді VPN. VPN – це один із видів комп’ютерних мереж, що застосовує технологію захисту інформації в відкритому Інтернеті, засновану на застосуванні екранування між мережами та захисту трафіку мережі криптографічними методами. Дана технологія створена для об’єднання довірених мереж, вузлів і клієнтів між собою через захищені та відкриті для всіх мережі, щоб забезпечити передачу даних від станцій екологічних досліджень до серверів накопичення та обробки даних. Система безпеки проєктованої мережі не ґрунтується на одному методі, а використовує комплекс засобів захисту, що передбачає обладнання та використані протоколи.

Для визначення інформаційних потреб підприємства з екологічних досліджень, проаналізовано усю сукупність раніше зазначених вимог, технічних аспектів проєктування та узгоджено з замовником технічне завдання. Враховуючи об’єм даних, які передаються у мережі сформовано таблицю (табл. 1) інформаційних потреб підприємства. Зазвичай у мережі існує 3 види трафіку: локальний трафік, трафік до БД і трафік до глобальної мережі Інтернет.

Відповідно до аналізу потоків даних, описаному у [7], та інформаційної потреби підприємства, пропускна здатність мережі для кожного користувача наведена в табл. 2.

Таблиця 1

Таблиця інформаційної потреби підприємства

Елементи структури	Кількість пристроїв	Локальний трафік	Трафік до БД	Канал Ethernet
Відділ адміністрації				
Директор	1	25 Гб	35 Гб	40 Гб
Голова технологічного відділу	1	50 Гб	40 Гб	50 Гб
Голова відділу аналізу даних	1	50 Гб	40 Гб	50 Гб
Користувачі Wi-Fi	20	70 Гб	0 Гб	70 Гб

Розрахунок навантаження каналу всередині підрозділів до кожної робочої станції за формулою 1:

$$W_{group_i} = \frac{T_{I_i}}{N_i} + \frac{T_{L_i}}{N_i} + \frac{T_{BD_i}}{N_i} \quad (1)$$

де T_{I_i} – трафік Ethernet, T_{L_i} – локальний трафік, T_{BD_i} – трафік до бази даних, N_i – кількість робочих місць даного відділу.

Результатів розрахунку наведений у табл. 3.

З розрахунків видно, що канали головної магістралі справляються з навантаженням, оскільки коефіцієнт використання мережі на всіх ділянках знаходиться в межах до 39,82 %, відповідно використовуваний стандарти передачі даних задовольняє трансфер відповідного трафіку.

Проводимо розрахунок навантаження каналів головної магістралі за формулою 2:

$$W_{group_i} = T_{I_i} + T_{L_i} + T_{BD_i} \quad (2)$$

де T_{I_i} – трафік Ethernet, T_{L_i} – локальний трафік, T_{BD_i} – трафік до бази даних.

Таблиця 2

Вхідні дані трафіку мережі

Елементи структури	Кількість пристроїв	Локальний трафік	Трафік до БД	Канал Ethernet
Відділ адміністрації				
Директор	1	7,11 Мбіт/с	9,96 Мбіт/с	11,38 Мбіт/с
Голова технологічного відділу	1	14,22 Мбіт/с	11,38 Мбіт/с	14,22 Мбіт/с
Голова відділу аналізу даних	1	14,22 Мбіт/с	11,38 Мбіт/с	14,22 Мбіт/с
Користувачі Wi-Fi	20	7,96 Мбіт/с	0 Мбіт/с	7,96 Мбіт/с

Таблиця 3

Приклад результату розрахунків навантаження каналів

Елементи структури	Навантаження каналу, W_{group_i}	Використовуваний стандарт передачі даних	Коефіцієнт використання каналу
Відділ адміністрації			
Директор	28,45 Мбіт/с	Fast Ethernet 100Base-FX	28,45 %
Голова технологічного відділу	39,82 Мбіт/с	Fast Ethernet 100Base-FX	39,82 %
Голова відділу аналізу даних	39,82 Мбіт/с	Fast Ethernet 100Base-FX	39,82 %
Користувачі Wi-Fi	15,92 Мбіт/с	802.11 ac (867 Мбит/с)	1,84 %
Всього		124,01 Мбіт/с	

Результати розрахунків навантаження каналів головної магістралі наведені у табл. 4.

З розрахунків побачимо, що більшість каналів справляються з навантаженням, оскільки коефіцієнт використання каналу не перевищує 40 %.

Проводимо розрахунок навантаження каналів в серверній зоні, тобто від головного комутатора до Web-, File-серверів та серверу-репозиторію за наступними формулами відповідно:

$$W_{Web_i} = \sum_{i=1}^n T_{I_i} \quad (3)$$

$$W_{File_i} = \sum_{i=1}^n T_{L_i} \quad (4)$$

$$W_{Data_i} = \sum_{i=1}^n T_{DB_i} \quad (5)$$

$$W_{repository_i} = \frac{W_{Data_i}}{t} \quad (6)$$

де T_{I_i} – трафік Ethernet, T_{L_i} – локальний трафік, T_{DB_i} – трафік до бази даних, t – кількість робочих годин.

Результати розрахунку наведені у таблиці 5.

З розрахунків видно, що канали серверної зони справляються з навантаженням, оскільки коефіцієнт використання мережі на всіх ділянках знаходиться в межах 18,19 %. Відповідно використовувані стандарт передачі даних задовольняє трансфер відповідного трафіку.

Згідно інформаційних потреб підприємства та організаційної структури, створено логічну структуру мережі, для наочного представлення кількості та положення використовуваних пристроїв, кількості підмереж, використовуваних стандартів передачі даних. Логічна структура схеми проєктованої мережі для екологічного підприємства зображена на рис. 1.

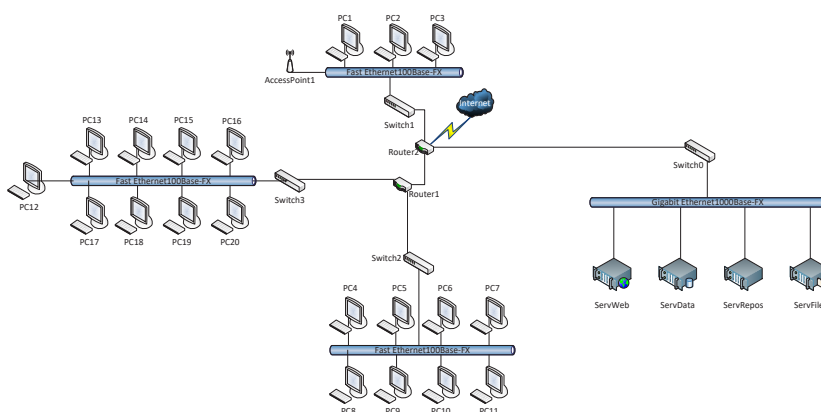


Рис. 1. Логічна структурна схема мережі екологічного підприємства

Таблиця 4

Таблиця результатів розрахунків навантаження каналів головної магістралі

Магістраль мережі	Навантаження каналу, W_{group_i}	Використовуваний стандарт передачі даних	Коефіцієнт використання каналу
Router2 – Switch1 (відділ адміністрації)	124,01 Мбіт/с	Gigabit Ethernet 1000Base-FX	12,4 %
Switch2 – Router1 (відділ обслуговування №1)	134,78 Мбіт/с	Gigabit Ethernet 1000Base-FX	13,48 %
Switch3 – Router1 (відділ обслуговування №2)	141,28 Мбіт/с	Gigabit Ethernet 1000Base-FX	14,13 %
Switch0 – Router2 (Серверний відділ)	402,07 Мбіт/с	Gigabit Ethernet 1000Base-FX	40,2 %

Таблиця 5

Таблиці результатів розрахунків навантаження каналів в серверній зоні

Магістраль мережі	Навантаження каналу, W_{group_i}	Використовуваний стандарт передачі даних	Коефіцієнт використання каналу
Web-сервер	122,17 Мбіт/с	Gigabit Ethernet 1000Base-FX	12,22 %
File-сервер	181,94 Мбіт/с	Gigabit Ethernet 1000Base-FX	18,19 %
Сервер-репозиторій	11,99 Мбіт/с	Gigabit Ethernet 1000Base-FX	1,19 %
Data-сервер	95,97 Мбіт/с	Gigabit Ethernet 1000Base-FX	9,59 %

Логічна структурна схема, яка зображена на рисунку 1, розбита на 5 підмереж. При проектуванні мережі буде використано 2 маршрутизатори та 4 комутатори. Мережа має 1 точку доступу Wi-Fi.

Фізична структура проєктованої мережі для екологічного підприємства зображена на рис. 2.

Для розрахунку довжини кабелів враховано розміри приміщення та положення елементів мережі.

Результату розрахунків довжини кабелів представлено у табл. 6.

Згідно з табл. 6, порахувавши всі лінії проведення кабелю, визначено чому дорівнює загальна довжина кабелів в метрах.

У проєктованій мережі кабелі проходять по стінах приміщень на відстані 20 см від стелі, кабелі захищені закритими пластиковими коробками, кабелі кріпляться за допомогою спеціальних кабельних стяжок.

Схема кабельної системи розроблена відповідно до фізичної схеми розроблюваної мережі, логічної структури мережі та плану поверху.

Таблиця 6

Таблиця результатів розрахунків навантаження каналів у серверній зоні

Номер підмережі	Відділ/структурна одиниця	Лінія проведення	Довжина кабелю, м
1	Відділ аналізу даних № 1	Комутатор BO № 1->PC4	11,3
		Комутатор BO № 1->PC5	8,2
		Комутатор BO № 1->PC6	7,9
		Комутатор BO № 1->PC7	4,9
		Комутатор BO № 1->PC8	13,4
		Комутатор BO № 1->PC9	10,7
		Комутатор BO № 1->PC10	19,8
		Комутатор BO № 1->PC11	24,6
		Router1->Комутатор BO № 1	12,3

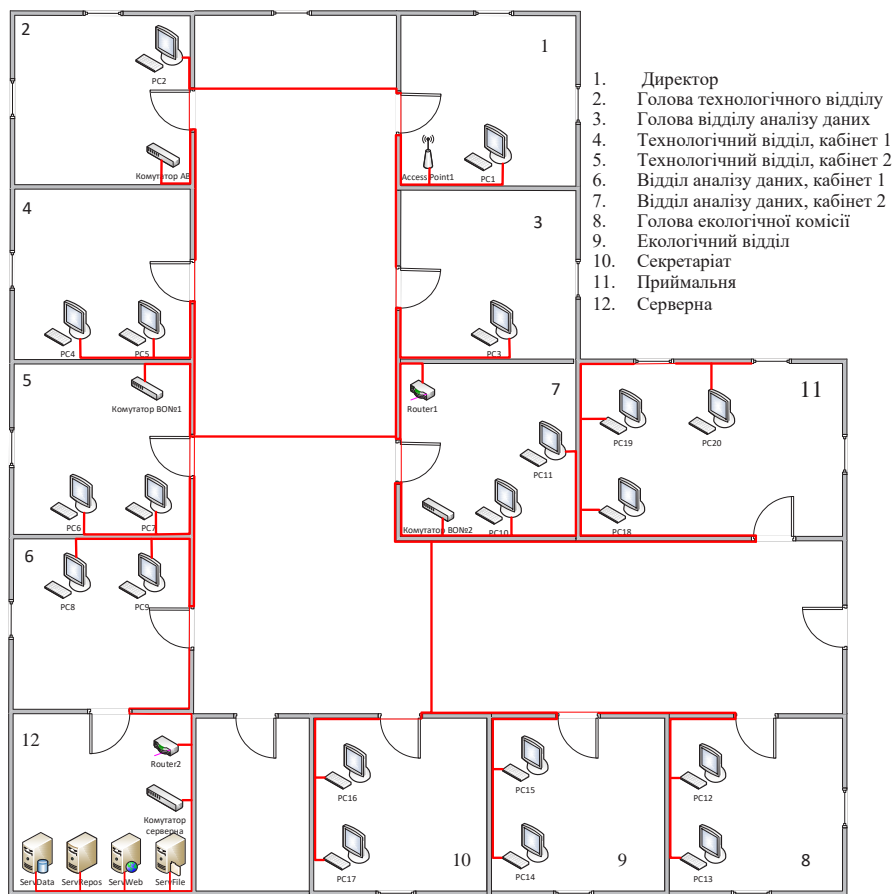


Рис. 2. Фізична структура мережі екологічного підприємства

Кабелі проводитимуться з урахуванням усіх вимог та за спеціально розробленою технологією. Схема кабельної системи зображена на рис. 3.

При розміщенні комп'ютерів були враховані вимоги по організації робочого місця користувачів, що припускають площу для одного робочого місця не менш 2,5 м² відповідно ДО ДСТУ 392-98. Передбачено, що приміщення з комп'ютерами обладнані системами опалення, кондиціонування повітря та припливно-витяжною вентиляцією.

Для безперебійної роботи мережі необхідно належне обслуговування, вибір і встановлення ліцензованого програмного забезпечення, для виконання завдань.

У подальшій роботі буде модельовано розроблену комп'ютерну мережу підприємства з екологічних досліджень базуючись на матеріалах з навчального посібника [9]. За результатами моделювання буде прийнято рішення про фізичну реалізацію розробки на підприємстві. Якщо мережа буде прийнята до реалізації та створена фізично на її основі буде розгорнуто проєктовану програмну інформаційну систему базуючись на прийомах та методах описаних у монографії [6] інтерпретованих для прогнозування екологічних показників.

Висновки. Таким чином, аналітичні розрахунки побудови та проєктування корпоративної комп'ютерної мережі з підтримкою технології Інтернету речей для підприємства екологічних досліджень, є важливими для досягнення оптимальності та результативності витрат виділеного бюджету, з урахуванням вимог замовника, для автоматизації завдання з отримання, обробки та

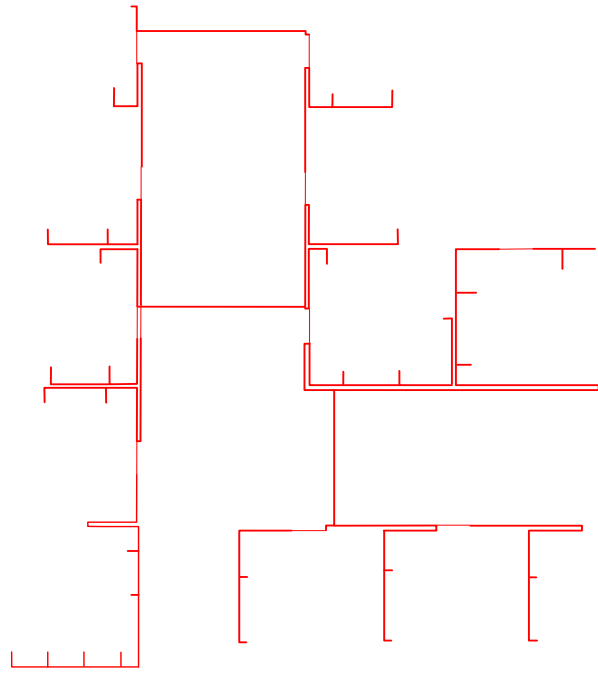


Рис. 3. Схема кабельної системи

запису екологічних показників у базу даних підприємства для подальшого напівавтоматичного формування звітності

В роботі вперше розроблено аналітичну модель корпоративної мережі, Були проведені розрахунки навантаження каналів в серверній зоні, синтезовано логічну, фізичну та кабельну схеми мережі підприємства. Застосування аналітичних методів забезпечує оптимальні показники швидкості та безпеки відповідно до рекомендацій до архітектури мережі Інтернету речей для підприємства з екологічних досліджень.

Список літератури:

1. Fathi Almushhadani A., & Khalil Alanezi M. Designing a Computer-Based Electronic Archiving System for Nineveh Health Department. *AL-Rafidain Journal of Computer Sciences and Mathematics*. 2018. 12(2). P. 39–48. DOI: <https://doi.org/10.33899/csmj.2018.163580>.
2. Торбенко О.С. Проєктування комп'ютерної мережі. Олександрівської ЗШ I-III ступенів № 1 Олександрівської районної адміністрації Кіровоградської області. 2021. 69 с.
3. Самойлов А.М., Конох І.С., Оксанич І.Г., Бельська, В.Ю. Побудова гетерогенної мережі підприємства з підтримкою QoS/QoE якості доставки інформації. *Збірник наукових праць Національного університету кораблебудування імені адмірала Макарова*. 2022. № 1 (488). С. 73–80. DOI: [https://doi.org/10.15589/znp2022.1\(488\).10](https://doi.org/10.15589/znp2022.1(488).10).
4. Смірнова Т.В., Верховець О.С., Буравченко К.О., Смірнов С.А., Гермак В.С. Алгоритмічне забезпечення для планування інформаційно-комунікаційної мережі підприємства на базі технологій 5G. *Збірник наукових праць Національного університету кораблебудування імені адмірала Макарова*. 2022. № 1 (488). С. 81–88. DOI: [https://doi.org/10.15589/znp2022.1\(488\).11](https://doi.org/10.15589/znp2022.1(488).11).
5. Бондаренко В.Г., Бондаренко П.В. Комп'ютерна інженерія в страхових компаніях. *Збірник наукових праць Національного університету кораблебудування імені адмірала Макарова*. 2022. № 4 (487). С. 40–44. DOI: [https://doi.org/10.15589/znp2021.4\(487\).7](https://doi.org/10.15589/znp2021.4(487).7).
6. Купін А.І., Музика І.О. Комп'ютерна підтримка прийняття рішень для автоматизованого керування буровибуховими роботами з мінімізацією енерговитрат, Кривий Ріг. 2013. 200 с.
7. Микитишин А.Г., Митник М.М., Стухляк П.Д., Пасічник В.В. Комп'ютерні мережі: навч. посібник. Книга 1, Львів, «Магнолія 2006», 2022. 256 с.

8. Микитишин А.Г., Митник М.М., Стухляк П.Д., Пасічник В.В. Комп'ютерні мережі: навч. посібник. Книга 2, Львів, «Магнолія 2006», 2017. 327 с.
9. Кеньо Г.В., Хома В.В. Моделювання розумного будинку в середовищі Cisco Packet Tracer, 2022. 104 с.

Korostelov A.S., Guchenko M.I., Perekrst A.L., Samoilo A.M., Vadurin K.O. ANALYTICAL CALCULATIONS OF THE CORPORATE NETWORK BASED ON THE INTERNET OF THINGS TECHNOLOGIES OF THE ENVIRONMENTAL RESEARCH ENTERPRISE

Today, the world is facing an extremely acute problem of maintaining a stable level of air purity, given the high level of urbanisation, the growing number of enterprises with atmospheric emissions and the increasing number of private vehicles. At the same time, significant irreversible changes are taking place in Ukraine due to the war and the destruction of the Kakhovka hydroelectric power station: the Kakhovka reservoir is becoming shallow; businesses are being relocated; internal migration is taking place; and the number of canals for irrigating fields in the southern part of Ukraine is decreasing. At the same time, the burden on environmental research organisations is increasing, as it is necessary to analyse the current state of the air, given the relocation of production facilities and the population from other regions, which cause changes in the density and intensity of emissions that were detected, statistically recorded, and predicted before the war and the Kakhovka environmental disaster. In order to automate some of the routine tasks in environmental research, to provide a hardware and network basis for the implementation of up-to-date information systems for analysing environmental data, the calculation of a corporate network based on IoT technologies for an environmental research enterprise is an urgent task. This paper uses methods and algorithms to calculate the designed network and select optimal solutions for its implementation. The work includes modelling various network use cases and calculating the necessary resources to support the functional requirements of the enterprise.

The purpose of the research is to calculate and design a corporate network of an environmental research enterprise supporting IoT technologies, which in the future will automate the tasks of obtaining, processing and recording environmental indicators in the enterprise database for further semi-automatic reporting.

The object of research is a corporate network.

The subject of the research is a corporate network based on IoT technologies of an environmental research enterprise.

The methodology used in this work is the application of: approaches to network design based on recommendations for the architecture of IoT and Industry 4.0 networks; methods of analytical calculations of broadband bandwidths; mathematical modelling of data transmission over networks.

In the course of the work, the requirements and needs of the enterprise were analysed, mathematical models were developed, algorithms were implemented, and calculations were carried out, which allowed to build an optimal corporate network using IoT technologies for an environmental research enterprise.

The scientific novelty of the work lies in the fact that for the first time an analytical model of the corporate network of an environmental research enterprise has been developed, which, unlike others, is developed using recommendations for the architecture of IoT networks and methods to ensure optimal information exchange and security.

The practical importance of the work lies in the development of an analytical model of a computer network of an enterprise for environmental research. Based on the results of the analytical model simulation, a decision will be made on the physical implementation of the development at the enterprise. If the network is accepted for implementation and physically created, the designed software information system for forecasting environmental indicators will be deployed on its basis.

Key words: LAN, computer network, TCP/IP, Wi-Fi, Ethernet, analytical calculations, IoT.

UDC 519.6:001.5

DOI <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2023.5/24>**Levkin D.A.**

State Biotechnological University

Zhernovnykova O.A.

H.S. Skovoroda Kharkiv National Pedagogical University

Synyavina Yu.V.

State Biotechnological University

Levkin A.V.

State Biotechnological University

VARIABILITY OF THE CHOICE OF THE MATHEMATICAL MODELS IN APPLIED SECURITY PROBLEMS

The variability of the choice of mathematical models for solving applied safety problems allows to substantiate the methods of nonlinear mathematical programming to increase the accuracy of the implementation of the main optimization task of increasing the quality of the biotechnological process of laser embryo division. This is achieved thanks to the implementation of several applied optimization mathematical models, which are partial cases of the main optimization problem. The article presents 9 applied optimization mathematical models of the process of laser action on the embryo. According to the authors of this article, the most meaningful is the applied optimization model for minimizing the number of thermally injured cells. Other applied optimization mathematical models presented in this article are auxiliary and contain general recommendations for optimizing the technical parameters of laser emitters and improving the quality of laser embryo division.

Optimization of technical parameters is possible only after calculating the values of the temperature of laser action, that is, after solving a nonlocal boundary value problem with a system of heterogeneous, nonlinear, multidimensional partial differential equations with conjugation conditions in the layers of the embryo. To substantiate the correctness of the boundary value problem, the authors applied specialized methods of nonlinear mathematical programming based on the theory of pseudo-differential operators over the space of generalized functions of slow power growth. Taking into account the specific features of the boundary value problem and applied optimization mathematical models, the calculation of the values of the temperature field in the embryo was carried out by the methods of separated variables and uncertain coefficients. Applying the calculated temperatures of laser heating in the layers of the embryo, a mathematical model of minimizing the number of thermally injured embryos was implemented.

Key words: *variability, safety environment, bioobject, optimization mathematical models, mathematical programming problems.*

Formulation of the problem. Currently, the greatest interest is in mathematical models, methods for implementing the parameter optimization process and their application to solving particular problems. Mathematical models for calculating the temperature of laser exposure on a multilayer microbiological object (embryo) are non-local boundary value problems for a system of partial differential equations. The correctness of the calculated mathematical models (boundary value problems) entails the correctness of the main problem of optimizing the parameters of laser division of the embryo.

In the article, based on the variable analysis of mathematical methods and models, the problem

of designing a safe environment for the embryo under the influence of laser radiation sources is solved. For this, the authors provide 9 applied optimization mathematical models and a calculated mathematical model of the process of laser action on the embryo. According to the authors of this article, the implementation of mathematical models for minimizing the number of thermally injured embryos and avoiding the temperature field from its predetermined value will allow to increase the accuracy and speed of optimization of the selected technical parameters of laser emitters, which will increase the viability of cells during laser division of embryos.

Analysis of recent research and publications.

Having analyzed the phase composition of cast iron alloys and using specialized optical-mathematical methods, the article [1] developed a structural approach for controlling the production of mechanisms and their use in heavy engineering. Proposed mathematical methods and designed devices for increasing the efficiency of ensuring biotechnological processes in animal husbandry [2]. The work [3] analyzed the advantages and disadvantages of the most well-known currently existing technologies for laser division of embryos, and solved certain applied problems of improving the quality of laser division of embryos for embryo transplantation. Having analyzed some existing cyber threats to electrical systems in Ukraine, article [4] proposes methods for increasing the efficiency of electrical systems, which are based on the theory of systems with distributed parameters. The authors of publications [5–7] conducted fundamental research on computational and applied optimization mathematical models in applications to systems with distributed parameters, in particular to solving optimization problems for thermophysical, electrical and mechanical systems.

Using dynamic models and methods of economic modeling in articles [8, 9], strategies for optimal management of technical innovations to minimize the effects of risks in the production activity of domestic agricultural enterprises were developed. The authors of articles [10, 11] studied mechanisms for attracting additional investments from domestic and foreign investors to reduce the influence of risk factors in the production activities of domestic agricultural enterprises.

Task statement. Determine and justify the conditions for creating a safe environment for the biological object when using innovative research methods.

Outline of the main material of the study. Let's consider some applied optimization mathematical models.

Mathematical model 1. It is necessary to minimize the difference between the values of the temperature field at given points of the multilayer system (Fig. 1) and pre-specified permissible values of the temperature field:

$$\min_{z^* \in Z} \max_{\substack{(x_i, y_i, z_i) \in \Omega_i \\ i=1, N \\ t \in [t_0, t^*]}} |T_i(x_i, y_i, z_i, t, z^*) - T^*|, \quad (1)$$

where $T_i(x_i, y_i, z_i, t, z^*)$ – temperature field;
 T^* – permissible temperature field values;
 $(x_i, y_i, z_i) \in \Omega_i \in \Omega^*, i = 1, \dots, N$ – area of multilayer microbiological material;
 z^* – vector of parameters of thermal effects on multilayer microbiological material;
 t_0 – initial time t ;
 t^* – final point in time t .

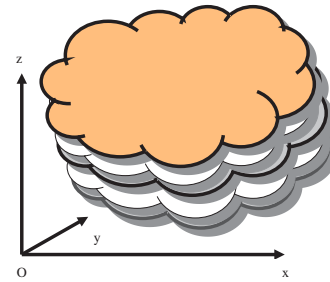


Fig. 1. Multilayer structure of microbiological material

Mathematical model 2. It is necessary to minimize the maximum value, among control points, of the temperature field, find

$$\min_{z^* \in Z} \max_{\substack{(x_i, y_i, z_i) \in \Omega_i \\ i=1, N \\ t \in [t_0, t^*]}} T_i(x_i, y_i, z_i, t, z^*). \quad (2)$$

Notice, that $T_i(x_i, y_i, z_i, t, z^*)$ – temperature field of the point area $(x_i, y_i, z_i) \in \Omega_i \in \Omega^*, i = 1, \dots, N$ multilayer microbiomaterial Ω , a z^* – vector of parameters of thermal impact on multilayer microbiomaterial.

Mathematical model 3. It is necessary to minimize, in terms of thermal impact parameters, the maximum value of the temperature field in the area of multilayer microbiological material:

$$\min_{z^* \in Z} \max_{\substack{(x, y, z) \in \Omega^* \\ t \in [t_0, t^*]}} T(x, y, z, t, z^*). \quad (3)$$

In the above mathematical model $T(x, y, z, t, z^*)$ is the temperature field of the area of points $(x, y, z) \in \Omega^*$ multilayer microbiomaterial Ω , t_0 and t^* – start and end times t .

Mathematical model 4. It is necessary to minimize, according to the thermal impact parameters, the maximum value of the temperature field gradient modulus in the area of points Ω^* , multilayer microbiological material Ω , that is, find

$$\min_{z^* \in Z} \left[\max_{\substack{(x, y, z) \in \Omega^* \\ t \in [t_0, t^*]}} |grad T(x, y, z, t, z^*)| \right]. \quad (4)$$

Wherein $T(x, y, z, t, z^*)$ is the temperature field of the area of points $(x, y, z) \in \Omega^*$ multilayer (N-layer) microbiomaterial Ω , a z^* – vector of thermal effect parameters.

Mathematical model 5. In practice, there are often problems when it is necessary to estimate the number of viable and thermally injured embryos. This problem arises during laser division of early elite cattle embryos for further transplantation of embryo parts. In this case, it is necessary to maximize the number of viable embryos, that is, find

$$\sum_{i=1}^N T_i(x_i, y_i, z_i, t, z^*) \rightarrow \max_{\substack{(x_i, y_i, z_i) \in \Omega_i^* \\ t \in [t_0, t^*] \\ z^* \in Z \\ i=1, N}}, \quad (5)$$

where $T_i = \begin{cases} 0, & T_i > T^*, \\ 1, & T_i \leq T^*; \end{cases}$

T_i – the value of the temperature field in the area of points of a multilayer (three-layer) microbiological object (embryo) Ω .

Notice, that T^* – this is the permissible temperature at the points belonging to the embryos, t_0 and t^* – start and end times t , a z^* – vector of thermal effect parameters.

Mathematical model 6. Consider the problem of controlling the nature of the interlayer distribution of the temperature field:

$$\min_{z^* \in Z} \left| \max_{(x,y,z) \in N_1} T(x,y,z,t,z^*) - \max_{(x,y,z) \in N_2} T(x,y,z,t,z^*) \right|, \quad (6)$$

where N_1, N_2 – areas occupied by controlled layers.

In its turn, $T(x,y,z,t,z^*)$ – temperature field, t_0 and t^* – start and end times t , a z^* – vector of laser beam action parameters.

Mathematical model 7. Consider the problem of monitoring thermal stresses arising between layers:

$$\min_{z^* \in Z} \left(\max_{(x,y,z) \in N_1} T(x,y,z,t,z^*) - \min_{(x,y,z) \in N_2} T(x,y,z,t,z^*) \right). \quad (7)$$

Wherein $T(x,y,z,t,z^*)$ is the temperature field of the regions N_1, N_2 adjacent layers of microbiological material Ω .

Mathematical model 8. Consider the problem of minimizing the deviation (deviation) of the temperature field of a microbiological material, when exposed to a laser beam, from a predetermined (desired) distribution of the temperature field in the area of points of the microbiological material:

$$\min_{z^* \in Z} \max_{(x,y,z) \in \Omega} \left(\int_{\Omega} (T(x,y,z,t,z^*) - T_0(x,y,z,t))^2 d\Omega \right)^{1/2}, \quad (8)$$

where $T_0(x,y,z,t)$ – predetermined (desired) distribution of the temperature field in the region Ω^* microbiological material Ω .

Mathematical model 9. Consider the problem of minimizing the deviation (deviation) of the temperature field of a microbiological material, when exposed to a laser beam, from a predetermined (desired) distribution $T_0(x,y,z,t)$ temperature field on a smooth curve L in microbiological material:

$$\min_{z^* \in Z} \max_{(x,y,z) \in L} \left(\int_L (T(x,y,z,t,z^*) - T_0(x,y,z,t))^2 dL \right)^{1/2}. \quad (9)$$

In turn, in the formula (9) $T(x,y,z,t,z^*)$ – temperature field of points $(x_i, y_i, z_i) \in L$ smooth curve of multilayer microbiological material Ω .

To implement applied optimization mathematical models, the values of the objective function

(temperature field) are required, which are obtained by solving the boundary value problem of the process of laser exposure to the embryo. The main difficulty in parameterizing temperature fields is obtaining an analytical (approximately analytical) or algorithmic (numerical) representation of the solution to the boundary value problem depending on the changeable (during the system synthesis) parameters included in the formulation of the original boundary value problems. In the case where there is an analytical solution to a boundary value problem, which organically includes the required parameters, it is possible to eliminate the time-consuming process of solving a series of similar boundary value problems. Such analytical solutions, unfortunately, are available only for classical domains (segment, circle, circle, ball, sphere). Note that the consideration of any new boundary value problem describing the temperature field in the system under consideration requires overcoming the difficulties associated with the field parameterization stage [12–14].

Calculation mathematical model of the process of laser exposure to an embryo:

$$\begin{cases} \rho_e c_e \frac{\partial T_e}{\partial t} - \lambda_1 \left(\frac{\partial^2 T_e}{\partial r^2} + \frac{2}{r} \frac{\partial T_e}{\partial r} \right) + q_e = 0, & r \in [0; r_1], t \in [0; t_1]; \\ \rho_e c_e \frac{\partial T_e}{\partial t} - \lambda_2 \left(\frac{\partial^2 T_e}{\partial r^2} + \frac{2}{r} \frac{\partial T_e}{\partial r} \right) + q_e = 0, & r \in [r_1; r_2], t \in [t_1; t_2]; \\ \dots & \dots \\ \rho_N c_N \frac{\partial T_N}{\partial t} - \lambda_N \left(\frac{\partial^2 T_N}{\partial r^2} + \frac{2}{r_N} \frac{\partial T_N}{\partial r} \right) + q_N = 0, & r \in [r_{N-1}; r_N], t \in [t_{N-1}; t_N], \end{cases} \quad (10)$$

where ρ_e – density coefficient e layer of multilayer (N – layer) microbiomaterial, where $e = 1, \dots, N$;

c_e – heat capacity coefficient of the e layer of multilayer (N – layer) microbiomaterial;

λ_e – thermal conductivity coefficient of the e layer of multilayer microbiomaterial;

q_e – specific power density of thermal loads in a multilayer microbiomaterial;

$T_e = T_e(r, t)$ – temperature field of points of the e layer of multilayer microbiomaterial;

r_e – spatial coordinate;

t_e – time parameter.

Dirichlet boundary conditions:

$$\begin{cases} T(r, t) \Big|_{t=t_0} = T_0; \\ T(r, t) \Big|_{r=r_n} = T_n. \end{cases} \quad (11)$$

Equalities in the division of media:

$$\begin{cases} T_1(r_1, t_1) = T_2(r_2, t_2), & -\lambda_1 \frac{\partial T_1}{\partial r} = -\lambda_2 \frac{\partial T_2}{\partial r}; \\ T_2(r_2, t_2) = T_3(r_3, t_3), & -\lambda_2 \frac{\partial T_2}{\partial r} = -\lambda_3 \frac{\partial T_3}{\partial r}; \\ \dots & \dots \\ T_{N-1}(r_{N-1}, t_{N-1}) = T_N(r_N, t_N), & -\lambda_{N-1} \frac{\partial T_{N-1}}{\partial r} = -\lambda_N \frac{\partial T_N}{\partial r}. \end{cases} \quad (12)$$

The notations are the same as in the system of differential heat conduction equations (10).

Boundary conditions of heat exchange:

$$\left(\lambda_1 \frac{\partial T_1}{\partial r} - A(T_1 - T_{ext}) \right) \Big|_{r=0} = 0, \quad (13)$$

where λ_1 – thermal conductivity coefficient of the outer layer of a multilayer (N -layer) microbiological material;

A – heat transfer parameter of the outer (outer) layer of a multilayer microbiological material;

T_{ext} – ambient temperature.

Taking into account the specifics of laser action, boundary conditions (13) will look as follows:

$$-\lambda_1 \frac{\partial T_1}{\partial r}(0, t) = qS, \quad 0 \leq t \leq h, \quad (14)$$

where q – specific heat flux;

S – diameter of heat source.

Let us divide the solution of the differential heat equation from system (10) into the sum of two solutions:

$$T(r, t) = T_{g.h.}(r, t) + T_{p.i.}(r, t), \quad (15)$$

where $T_{g.h.}(r, t)$ – general homogeneous solution;

$T_{p.i.}(r, t)$ – private inhomogeneous solution.

General homogeneous solution:

$$T(r, t) = u(r)v(t). \quad (16)$$

Substituting $T(r, t)$ into the equation of system (10), we got:

$$v'(t)u(r) - a(v(t)u''(r) + \frac{2}{r}v(t)u'(r)) = 0. \quad (17)$$

Transformed the differential equation (17):

$$v'(t) = cv(t), \quad u''(r) + \frac{2}{r}u'(r) = \frac{c}{a}u(r). \quad (18)$$

Solving an equation with separating variables and a Fuchs class equation, respectively:

$$v(t) = e^{ct}, \quad u_1(r) = \sum_{k=0}^{\infty} \frac{c^k r^{2k-1}}{a^k ((2k)!!)^2} \quad \text{and} \quad (19)$$

$$u_2(r) = \sum_{k=0}^{\infty} \frac{c^k r^{2k}}{a^k ((2k+1)!!)^2}.$$

Let us write down the general homogeneous solution of the differential equation:

$$T(r, t) = (c_1 u_1(r) + c_2 u_2(r)) e^{ct}. \quad (20)$$

Particular inhomogeneous solution of the heat equation from system (10):

$$T_{u.h.}(r, t) = -\frac{q_e}{6a} r^2. \quad (21)$$

Using the results obtained, we write the solution to the differential heat equation from the system (10):

$$T(r, t) = T(0, 0) e^{ct} \sum_{k=0}^{\infty} \frac{c^k r^{2k}}{a^k ((2k+1)!!)^2} - \frac{q_e}{6a} r^2 g(t). \quad (22)$$

Having obtained the solution function to the boundary value problem (10)–(14), we proceed to the implementation of the applied optimized mathematical model 5, that is, to minimizing the number of viable cells.

Conclusions. Having studied the variability of applied optimization mathematical models for solving the problem of designing a safe environment for a biological object, the article proposes and substantiates the conditions for improving the quality of the biotechnological process of laser embryo division. Increasing the viability of cells is achieved due to the implementation of the mathematical models proposed in the article. It should be noted that for the optimization of the selected parameters of the biotechnological process, the values of the temperature of the laser action are required, which are obtained after the implementation of non-local boundary value problems of systems of multidimensional equations of thermal conductivity. Taking into account the specific features of applied optimization mathematical models, analytical methods of nonlinear mathematical programming were chosen to calculate the values of the temperature field. Increasing the accuracy of ensuring the control using the technical resources of laser emitters, which is achieved thanks to the use of the layer-by-layer distribution of temperature fields in the embryo obtained in this article, will allow to increase the level of viability of the bioobject during laser division.

Bibliography:

1. Scoblo T.S., Klochko O.Yu., Belkin E.L., Sidashenko A.I., Avetisyan V.K. Structure formation of high-chromium cast irons in the temperature range of the magnetic transformation of carbide phases. *Letters on Materials*. 2020. Vol. 10. No. 2. Pp. 129–134. <https://doi.org/10.22226/2410-3535-2020-2-129-134>
2. Paliy A.P., Ulko Y.S., Bogomolov O.O., Kis-Korkishchenko L.V., Kambur M.D., Zamazyi A.A et al. Species composition of microbiota of cows udder and raw milk quality at mastitis. *Ukrainian journal of ecology*. 2020. Vol. 10. No. 4. Pp. 78–85. DOI: 10.15421/2020_171
3. Antinori S. Experience with the UV non contact laser in a assisted hatching in human. *Journal of Assist Reprod and Genet*. 1997. Vol.14. Issue 5. 200 p. <https://doi.org/10.36887/2415-8453-2020-3-43>
4. Куцан Ю.Г., Гурєєв В.О., Лисенко Є.М., Аветісян О.В. Кіберзагрози в електроенергетичних системах України. *Електронне моделювання*. 2019. Т. 41. № 2. С. 63–80.
5. Andreieva D.N., Ignatovich S.Yu. On constructing single-input non-autonomous systems of full rank. *Вісник Харківського національного університету ім. В.Н. Каразіна. Серія: «Математика, прикладна математика і механіка»*. Харків, 2018. Т. 88. С. 35–43. DOI: 10.26565/2221-5646-2018-88-04

6. Pavlichkov S. A small gain theorem for finite-time input-to-state stability of infinite networks and its applications. *Вісник Харківського національного університету ім. В.Н. Каразіна. Серія: «Математика, прикладна математика і механіка»*. Харків, 2021. Т. 94. С. 40–59. <https://doi.org/10.26565/2221-5646-2021-94>
7. Grebennik I.V., Kovalenko A.A., Romanova T.E., Urniaieva I.A., Shekhovtsov S.B. Combinatorial Configurations in Balance Layout Optimization Problems. *Cybernetics and Systems Analysis*. 2018. Vol. 54. Issue. 2. Pp. 221–231. <https://doi.org/10.1007/s10559-018-0023-2>
8. Babenko V., Nazarenko O., Nazarenko I., Mandych O., Krutko M. Aspects of program control over technological innovations with consideration of risks. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2018. Vol. 3. No. 4 (93): Mathematics and Cybernetics applied aspects. Pp. 6–14. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2018.133603>
9. Levkina R., Petrenko A. Management of innovative marketing techniques as an effective business tool. *Agricultural and Resource Economics: International Scientific E-Journal*. 2019. Vol. 5. Issue 1. Pp. 37–47. DOI: 10.22004/ag.econ.287141
10. Yarmoliuk A.V., Reznik N.P. Use of investment strategies of risk management of agricultural products on the stock exchange market. *International Journal of Innovative Technologies in Economy*. 2021. No. 1(33). Pp. 1–4. https://doi.org/10.31435/rsglobal_ijite/30032021/7392
11. Суска А.А., Харченко Т.М. Удосконалення системи управління ризиками на підприємстві. *Вісник Харківського національного аграрного університету ім. В.В. Докучаєва. Серія: «Економічні науки»*. Харків: Національний аграрний університет ім. В.В. Докучаєва, 2019. № 2. С. 254–263.
12. Левкін Д.А., Жерновникова О.А. Розробка математичних моделей прикладних задач геометричного проектування технічних систем. *Вісник Хмельницького національного університету. Серія «Технічні науки»*. Хмельницький, 2022. №4 (311). С. 133–136. DOI: 10.31891/2307-5732-2022-311-4-133-136
13. Levkin A., Abuselidze G., Berezhna N., Levkin D., Volkova T., Kotko Y. The Quality Function in Determining the Effectiveness of Example Bioeconomics Tasks. *Rural Sustainability Research*. 2022. Vol. 48. Issue. 343. Pp. 91–102. DOI 10.2478/plua-2022-0019
14. Palii A.P., Ishchenko K.V., Bredykhin V.V., Gurskyi P.V., Levkin D.A., Antoniuk A.A. et al. Effect of various milking equipment on milk ejection in high-yielding cows. *Ukrainian Journal of Ecology*. 2021. Vol. 11. Issue. 1. Pp. 18–24. DOI: 10.15421/2020_303

Левкін Д.А., Жерновникова О.А., Синявіна Ю.В., Левкін А.В. ВАРІАТИВНІСТЬ ВИБОРУ МАТЕМАТИЧНИХ МОДЕЛЕЙ У ПРИКЛАДНИХ БЕЗПЕКОВИХ ЗАДАЧАХ

Варіативність вибору математичних моделей для розв'язання прикладних безпекових задач дозволяє обґрунтувати методи нелінійного математичного програмування для підвищення точності реалізації основної оптимізаційної задачі збільшення якості біотехнологічного процесу лазерного ділення ембріона. Це досягається завдяки реалізації декількох прикладних оптимізаційних математичних моделей, які є частковими випадками основної оптимізаційної задачі. В статті наведені 9 прикладних оптимізаційних математичних моделей процесу лазерної дії на ембріон. На думку авторів цієї статті, найбільш змістовною є прикладна оптимізаційна модель мінімізації числа термічно-травмованих клітин. Інші ж наведені в цій статті прикладні оптимізаційні математичні моделі є допоміжними та містять загальні рекомендації щодо оптимізації технічних параметрів лазерних випромінювачів і підвищення якості лазерного ділення ембріона.

Оптимізація технічних параметрів можлива лише після розрахунку значень температури лазерної дії, тобто після розв'язання нелокальної крайової задачі з системою неоднорідних, нелінійних, багатовимірних диференціальних рівнянь в частинних похідних з умовами спряження в шарах ембріона. Для обґрунтування коректності крайової задачі автори застосували спеціалізовані методи з нелінійного математичного програмування, що базуються на теорії псевдодиференціальних операторів над простором узагальнених функцій повільного степеневого зростання. Врахувавши специфічні особливості крайової задачі і прикладних оптимізаційних математичних моделей, розрахунок значень температурного поля в ембріоні здійснений методами відокремлених змінних і невизначених коефіцієнтів. Застосувавши обчислені температури лазерного нагріву в шарах ембріона, реалізована математична модель мінімізації числа термічно-травмованих зародків.

Ключові слова: варіативність, безпекове середовище, біооб'єкт, оптимізаційні математичні моделі, задачі математичного програмування.

Лихошерстов Д.О.

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

Лебедев Д.Ю.

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

ПОРІВНЯЛЬНИЙ АНАЛІЗ ЦИФРОВИХ ЗАСОБІВ СУРДОПЕРЕКЛАДУ

У останні роки відбувається суттєвий прогрес в розробці, адаптації та впровадженні систем сурдоперекладу в суспільство для спрощення життя людей із вадами слуху та мовлення.

У статті проводиться порівняльний аналіз систем сурдоперекладу, спрямований на визначення переваг та недоліків кожної системи для покращення комунікації для людей з вадами слуху. Виконано аналіз актуальних досліджень та підходів, що були представлені в різноманітних додатках, плагінах чи розширеннях для додатків щодо функціональних можливостей актуальних систем сурдоперекладу на базі смартфонів, персональних комп'ютерів та окремих апаратно-технічних рішень. В ході досліджень було проаналізовано ряд рішень, що використовують концептуально різні підходи в перекладі жестів. Найпопулярнішим залишається підхід у використанні живих сурдоперекладачів, котрі можуть бути як і професійними спеціалістами, так і волонтерами. Актуальним рішенням є застосування готових баз жестів для найпопулярніших жестових мов, де є можливість здійснювати переклад для не досвідчених користувачів. Найсучаснішим підходом є застосування технологій розпізнавання зображення на відео та технологій штучного інтелекту.

На жаль, реальна кількість унікальних рішень і відповідно програмних реалізацій у вигляді додатків не дозволяє в повному обсязі оцінити проблеми сурдоперекладу, але відповідно до поточних досліджень це і не є основним критерієм дослідження.

Ключові слова: сурдопереклад, жести, глохонімія, смартфон, додаток, штучний інтелект, порівняльний аналіз.

Постановка проблеми. Відповідно до статистики Всесвітньої організації охорони здоров'я (ВООЗ), опублікованої в пресреліз за 2021/2022 рік, кожен четвертий мешканець планети до 2050 року буде страждати проблемами порушення слуху, а це майже 2.5 млрд людей по всьому світі [1]. Також, відповідно до результатів досліджень ВООЗ, як мінімум 700 млн. людей [2] потребують кваліфікованого медичного догляду органів слуху, а також різноманітних реабілітаційних послуг.

Постійні погіршення слуху призводять до повної або часткової повної глухоти, що зумовлюють негативні процеси в мовленні та відповідно в здатності людини повноцінно комунікувати в суспільстві та бути частиною суспільства.

Наявність великої кількості глухонімих людей у світі створила актуальну проблему, котру намагаються вирішити великою кількістю наукових досліджень. В результаті досліджень формуються практичні інструменти подолання проблем кому-

нікації глухонімих людей в суспільстві. Основним підходом у розв'язання даної проблеми є створення програмних рішень.

Аналіз останніх досліджень і публікацій.

Слід зазначити, що сурдопереклад складається з двох основних частин: міміко-жестового мовлення та дактилології – пальцевої (ручної) абетки, за допомогою якої під час невербальної комунікації можна передавати новоутворені, специфічні слова, назви, абрєвіатури, прізвища та імена тощо, які не мають відповідного жестового позначення слова. Міміко-жестове мовлення – це система кінетичних знаків, що передають характерологічні особливості предметів, явищ навколишньої дійсності за допомогою визначених структурних елементів. Дактилологія або дактильна абетка – це унормований, стандартний набір відповідно до певної вербальної мови рухових або статичних знаків за участю пальців та кисті руки (рук), який є незмінним для позначення певної літери відповідно даної мови. Нині в суспільстві пара-

лельно використовуються два терміни: «перекладач жестової мови» та «сурдоперекладач». Сурдоперекладач – особа, яка володіє дактильним та міміко-жестовим мовленням і здійснює переклад на дактильне та міміко-жестове мовлення інформаційного повідомлення з будь-якої національної мови або навпаки. Внаслідок того, що в різних країнах застосовуються різні невербальні, жести системи спілкування, сурдопереклад, який здобув освіту в одній країні, далеко не завжди виявляється придатний до перекладу в іншій країні, навіть якщо в ній і поширена та ж державна мова. Таким чином, виникає гостра потреба в універсальних засобах сурдоперекладу. Слід зазначити, що під визначенням «універсальний» потрібно розглядати програмний або апаратно-програмний підхід, котрий можна масштабувати (програмно додавати нові регіони/країни і їх жестові мови), вдосконалювати (додавати нові жести/слова для вже наявних мов).

Будь-який підхід сурдоперекладу передбачає, що кожен учасник діалогу повинен володіти повною мірою міміко-жестовим мовленням чи дактилологією, а це, своєю чергою, дуже сильно звужує можливості комунікації глухонімих в суспільстві. Розв'язання даної проблеми є реалізацією програмних рішень у вигляді повноцінних застосунків, сервісів, розширень для смартфонів, персональних комп'ютерів чи спеціальних апаратно-технічних засобів.

Попри великий вибір готових систем сурдоперекладу, існує в них певний набір характеристик, котрі дозволяють оцінити можливості універсальності:

- Ефективність – точність розпізнавання жестів на вхідному наборі даних.
- Швидкодія – можливість здійснювати переклад в реальному часі або кількість часу витрачена для перекладу жестів.
- Кросплатформеність – можливість використовувати програмні рішення на будь-яких платформах.
- Доступність – можливість користуватися програмними рішеннями при відсутності відповідних апаратних засобів.

Метою статті є проведення порівняльного аналізу існуючих систем сурдоперекладу для смартфонів, персональних комп'ютерів та окремих апаратно-технічних засобів, виділити ключові фактори для виявлення ряду переваг та недоліків кожного рішення з урахуванням вищезазначених критеріїв універсальності. Завдяки аналізу сформулювати кінцевий принцип системи сурдоперекладу з урахуванням алгоритму сурдоперекладу,

сформованого в статті «Аналіз сучасних систем розпізнавання дактильної-жестової мови для систем» [3] та можливостей кросплатформеності [4], а також стек технологій для створення відповідного програмного забезпечення.

Виклад основного матеріалу. В сучасному світі існують концептуально різні підходи в здійсненні комунікації глухонімих людей в суспільстві.

По-перше, це використання живого спеціаліста, сурдоперекладача, в реальному часі під час відеозв'язку. Такий принцип реалізований в сервісах типу Video Relay Service (VRS) [5] та Video Remote Interpreting (VRI) [6]. Сурдоперекладач підключається до відеоконференцій або відеодзвінків і надає переклад мовлення на мову жестів в умовах реального часу.

По-друге, це здійснення перекладу текстових повідомлень в різноманітних додатках. Подібний підхід реалізується в сервісах типу Text Relay Service (TRS) [7]. В користувачів є можливість комунікувати за допомогою текстових повідомлень, а сурдоперекладач надає переклад шляхом отримання повідомлень від сурдо користувача та передає їх іншому співрозмовнику.

По-третє, це використання вебплатформ або мобільних додатків в поєднанні із штучним інтелектом, котрі передаючи інформацію через текст, відео, аудіо чи жести. Подібні рішення є найбільш популярними і вони надають можливість наживо перекладати мовлення на мову жестів чи текст шляхом поєднання різних технологій.

Недоліками перших двох підходів, є наявність живого спеціаліста, адже дуже складно забезпечити принцип універсальності і підтримки 24/7 для всіх користувачів.

Як зазначалося в статті «Аналіз сучасних систем розпізнавання дактильної-жестової мови для систем» [3], кожен програмний чи апаратно-програмний спосіб сурдоперекладу повинен бути двонаправний- комунікація до глухонімого і від глухонімого. Тому розглянемо найбільш популярні рішення, що допомагають глухим людям комунікувати у суспільстві з урахуванням вищезазначених критеріїв.

Для початку розглянемо додатки, що допомагають глухим людям комунікувати в суспільстві на прикладі Ava [8] або Google Live Transcribe [9] або Dragon Anywhere [10]. Такий тип додатків передбачає безпосередній функціонал спілкування за допомогою жестів у вигляді транскрипції мовлення в реальному часі, а також і набір додаткових опцій до наявного функціонала. Вони використовують технологію розпізнавання мовлення,

щоб перетворювати звукове мовлення на текст та відображають його на екрані пристрою, а також відтворювати за допомогою жестових мов. Недоліками подібних застосунків є відсутність деталізації мови жестів для конкретної країни чи регіону. Зазвичай є реалізація або найпопулярніших жестових мов, або реалізація найпопулярнішого набору жестів.

Подібний підхід реалізується і в додатках, котрі прямо не передбачають комунікацію за допомогою жестів. Існують застосунки для кастомізації екранних клавіатур смартфонів та планшетів – Gboard with ASL Stickers [11], Signily Keyboard [12]. Дані програми реалізують жестову мову у вигляді або наборів стікерів для жестової мови, які можуть бути використані під час текстової комунікації або як окрему мову на клавіатурі. Signily Keyboard використовує американську жестову мову (ASL) і містить жести та символи ASL [13]. Такі програми не дозволяють забезпечити для кожної жестової мови тип клавіатури або набір стікерів, бо розробники не зацікавлені у розв'язанні проблем глухонімих у світі, а керуються нормативно-правовими вимогами ринків чи регіонів в яких хочуть представити свій продукт.

Додатки, котрі дозволяють використовувати живих сурдоперекладачів по принципу VRS або VRI охоплюють найбільшу аудиторію в світі згідно з публічними даними. Наприклад, Sorenson Video Relay Service (SVRS) [14] або Be My Eyes [15] або RogerVoice [16] або Google Meet [17] або Microsoft Teams [18] та InterpreterNow [19] надають можливість сурдо споживачам здійснювати відеодзвінки через сурдоперекладача, який передає повідомлення у форматі мови жестів, але при цьому реалізуються абсолютно різний принцип приєднання спеціаліста до діалогу глухонімих людей. В таких програмах, як RogerVoice або Be My Eyes або Interpreter Now, передбачений функціонал для підключення оператора-сурдоперекладача за допомогою окремої кнопки/панелі кнопок, але кількість жестових мов, які охоплюють спеціалісти із підтримки додатків вкрай обмежена. В додатках Google Meet або Microsoft Teams наявний функціонал відображення кінцівок сурдоперекладача, але ніяких інструментів для автоматичного залучення перекладачів немає. Організатори відеодзвінків повинні самостійно знаходити та підключати відповідних спеціалістів.

Існують додатки або сервіси, що використовують набір жестів для конкретної жестової мови країни або містять набір різних мов для окремих країн – Spread Signs [20], Marlee Signs [21],

SignSchool [22], ASL Coach [23]. Слід зазначити, подібні додатки не мають прямого функціонала сурдоперекладу, а виступають лише як допоміжний інструмент – містять інтерактивні уроки та вправи або інші навчальні/тренувальні можливості в практикуванні жестової мови. Наприклад, Spread Signs [20] має великий словник жестів з можливістю пошуку жестів за словами або фразами. Marlee Signs [21] містить набір навчальних матеріалів і вправ для вивчення жестової мови, зокрема американської жестової мови – ASL [13]. Подібні рішення є гарним інструментом розширити навички сурдоперекладу, але ніяк не можуть виконувати самий сурдопереклад.

Найновіший спосіб сурдоперекладу реалізований в додатках, що використовують віртуального помічника або штучний інтелект – Hand Talk [21], Greta [22], SignAll Chat [23]. Реалізація перетворення тексту чи мовлення методами штучного інтелекту та віртуального помічника використовуючи різноманітні джерела зчитування інформації – камери, мікрофони чи дисплей. Такий тип додатків знаходиться на етапі розвитку і являти собою оптимальний, універсальний спосіб сурдоперекладу. За рахунок навчання штучного інтелекту можна збільшувати точність перекладу шляхом навчання на нових даних. Також віртуальний помічник – анімація людини дозволяє повністю прибрати людський фактор.

Проаналізувавши великий набір додатків для сурдоперекладу, їх переваги та недоліки, можна створити таблицю з порівнянням різних додатків сурдоперекладу.

Основними критеріями порівняння додатків в таблиці є апаратно-програмна відповідність, а саме якого типу рішення (мобільний додаток, розширення для додатку, програма для Unix чи Windows систем), платформи на які встановлюється (тип операційної системи на відповідній апаратній платформі).

Окремим критерієм порівняння є наявність кросплатформеності. Це дозволяє комплексно оцінити рішення з точки зору універсальності та можливості масштабування та адаптивності для різних країн та регіонів.

Для дослідження популярності візьмемо показники кількості завантажень та оцінку від користувачів із Google Play та AppStore. Слід зазначити, що в AppStore відображається лише оцінка від користувачів.

Останнім критерієм оцінювання застосунків є можливість підтримки та перекладу в реальному часі із графіком 24 години і 7 днів на тиждень.

Підтримка в реальному часі дозволить оцінити наскільки клієнтоорієнтований застосунок та як можна вирішувати нестандартні ситуації при користуванні додатком. Критерій «Підтримка перекладу людиною» дозволить оцінити наскільки ще актуальна проблема залежності сурдоперекладу від людини. Цей критерій напряду вже на проблеми сурдоперекладу і його залежності від людини.

В магазинах для додатків Google Play та AppStore пропонується велика кількість додатків, проаналізувати і дослідити, не мається можливості. Тому пропонується вибрати найпопулярніші рішення за кількістю завантажень та рейтингом, а також додати декілька специфічних додатків, що знайшлися в ході проведення дослідження.

Рішення	Тип рішення	Платформа	Крос платформеності	Кількість скачувань		Підтримка в реальному часі	Підтримка перекладу людиною
Ava	Mobile App	Windows/Mac/iOS/Android	+	GooglePlay	3.3 (100тис.+)	+	-
				AppStore	4.9		
Sorenson Video Relay Service	Services	-	+	-		+	+
Spread Signs	Mobile App	iOS/Android	-	GooglePlay	4.0 (500тис.+)	-	-
				AppStore	3.5		
Gboard	Mobile App	iOS/Android	-	GooglePlay	4.5 (5 млрд+)	-	-
				AppStore	3.7		
Marlee Signs	Mobile App	IOS	-	AppStore	3.3	-	-
SignSchool	Web/Mobile App	iOS/Android	-	GooglePlay	3.6 (100тис.+)	-	-
				AppStore	3.8		
Be My Eyes	Mobile App	iOS/Android	-	GooglePlay	4.4 (1 млн+)	+	+
				AppStore	4.9		
Signily Keyboard	Mobile App	iOS	-	AppStore	-	-	-
RogerVoice	Mobile App	iOS/Android	-	GooglePlay	3.9 (50тис.+)	-	+
				AppStore	4.7		
Google Meet	Web/PC/Mobil App	Windows/Linux/IOS/MAC/Android	+	GooglePlay	4.5 (5млрд+)	+	+
				AppStore	4.9		
Microsoft Teams	Web/PC/Mobil App	Windows/Linux/IOS/MAC/Android	+	GooglePlay	4.7(100 млн+)	+	+
				AppStore	4.6		
InterpreterNow	Desktop/Mobile App	Windows/iOS/Android	+	GooglePlay	4.2(10тис.+)	-	+
				AppStore	4.5		
Hand Talk	Mobile App	iOS/Android	-	GooglePlay	2.8 (1млн+)	-	-
				AppStore	4.0		
Greta	Mobile App	Android	-	GooglePlay	3.7(10тис.+)	-	-
SignAll Chat	Mobile App	iOS	-	AppStore	4.4	+	-
Google Live Transcribe	Extention/Mobile App	iOS/Android	-	GooglePlay	3.9(128тис.+)	-	-
				AppStore	4.6		
ASL Coach	Mobile App	iOS/Android	-	GooglePlay	2.6(1тис.+)	-	-
				AppStore	2.9		

Провівши аналіз таблиці з додатками для людей із вадами слуху та мовлення, виділяється певний набір додатків по популярності та технології перекладу.

Відповідно, Google Meet та Microsoft Team, є найпопулярнішими рішеннями, де до відео-конференції додається спеціаліст, коли потрібно

в реальному часі виконувати переклад жестів. Слід зазначити, що ці додатки не мають вбудованих, інтерактивних чи автоматизованих рішень для перекладу жестів без участі людини. Рішень від Gboard чи Signily Keyboard, скоріше, пропонують рішення для людей котрі вже володіють сурдоперекладом, адже при виборі мови жестів як

основного шару для екранної клавіатури смартфона, потрібно розуміти за що відповідає кожен із жестів. Такий підхід дуже сильно обмежує сферу застосування.

Окремим типом додатків, що мають відносно велику кількість звантаження (понад 2–3 тис.) це додатки в яких можна вивчати мову жестів. Наприклад, SignSchool або ASL Coach або Spread Signs спеціалізуються виключно на навчанні користувачів певних країн чи регіонів, де популярні відповідні жестові мови.

Спеціалізовані додатки, що розробляються виключно для перекладу жестів, на прикладі Marlee Signs або Google Live Transcribe або InterpreterNow або Ava, не є популярними та мають проблеми із підтримкою та подальшим розвитком та вдосконаленням. Слід зазначити, що Hand Talk або Greta або SignAll Chat використовують для перекладу засоби штучного інтелекту та комп'ютерного зору для розпізнавання, класифікації та перекладу жестів.

В результаті порівняльного аналізу можна стверджувати про наступні ключові речі:

– В сучасному світі відсутній єдине програмне або програмно-апаратні рішення для перекладу з чи на мову жестів. На цей момент, серед додатків популярним є використання живого сурдоперекладача і використання готової бази жестів і використання засобів штучного інтелекту.

– Відсутній єдиний підхід у розв'язання проблеми комунікації глухих та/або глухонімих людей у світі. ВООЗ та ООН лише говорять про проблему, але не про вирішення. Найбільші техно гіганти світі, Google або Microsoft, пропонують найпростіший підхід в сурдоперекладі – залучення живого перекладача.

– Відсутність обов'язкового двонаправленого режиму перекладу. Кожен із розглянутих додатків, що не використовує в якості перекладу живого спеціаліста, не має можливості перекладати з жестової мови і на жестову мову, тобто відсутність двонаправленого перекладу.

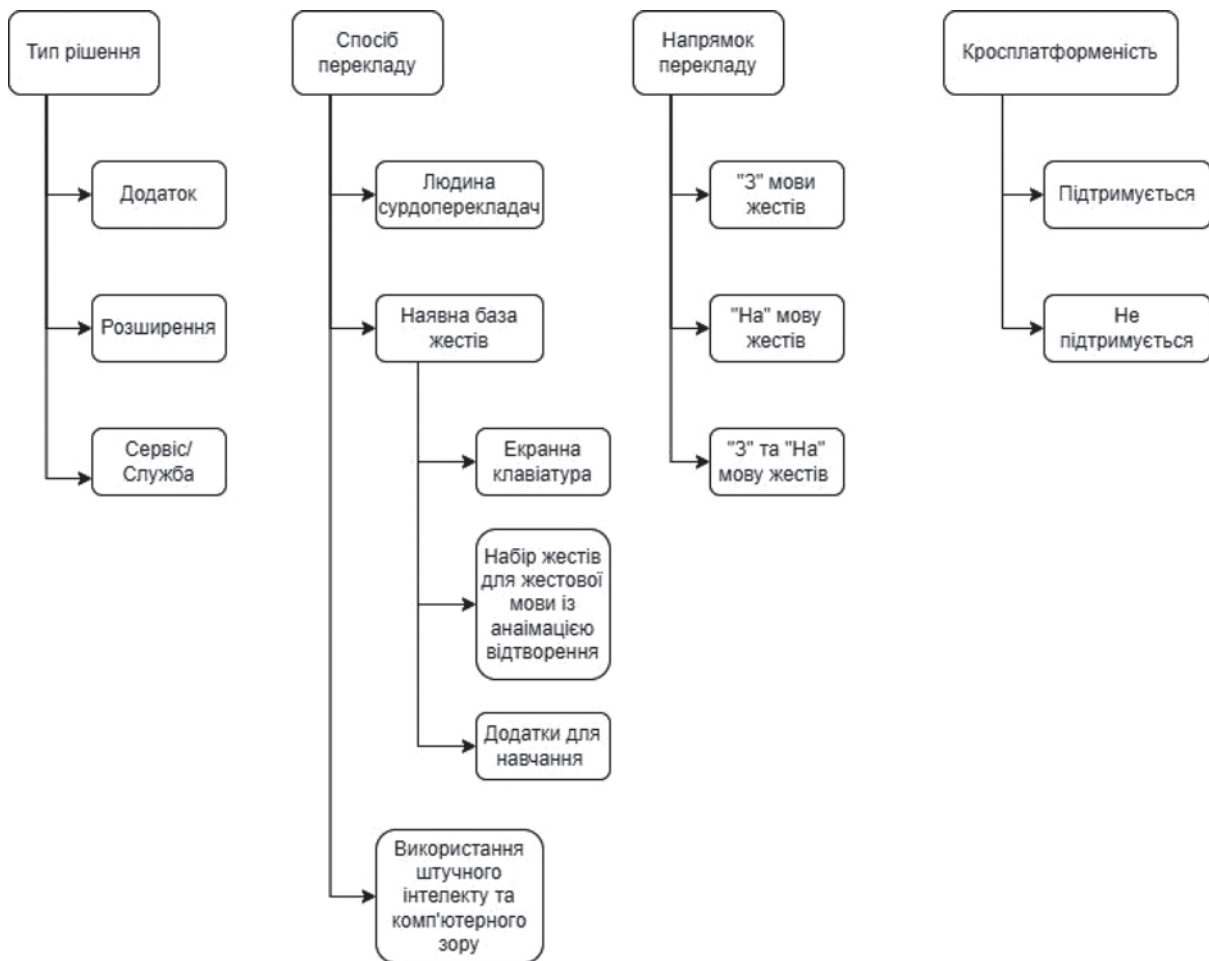


Рис. 1. Класифікація систем сурдоперекладу

Отже, на основі розглянутих підходів та рішень для сурдоперекладу, було розроблено нову класифікацію систем сурдоперекладу, котра представлена на рис. 1.

Висновки. Визначено, що існує багато систем сурдоперекладу для глухонімих людей, котрі спрощують момент спілкування в соціумі. Ці застосунки допомагають розпізнавати жести і перекладати на звичайну мову і навпаки, що в результаті прибирає бар'єр комунікації між глухонімими і здоровими людьми.

В результаті порівняльного аналізу з'ясовано, що застосунки в основі яких є використання живих спеціалістів мають найбільший попит. При цьому, слід зазначити, що такий тип застосунків поділя-

ється на наявність цілодобової підтримки (Be My Eyes, RogerVoice, InterpreterNow) та необхідності планувати дату та час підключення сурдоперекладача (SVRS, Google Meet, Microsoft Teams).

Різноманітність систем сурдоперекладу на базі смартфона чи персонального комп'ютера дозволяє структурувати всі рішення за рядом критеріїв, а саме типом платформи, підтримкою в реальному часі, можливістю кросплатформеності, популярності. Ця структура дозволяє оцінити більш глобально весь спектр рішення з наукової точки зору і на основі розширеної структурної класифікації запропонувати нові рішення. Також, даний аналіз буде корисний для споживачів, адже дозволяє зробити вибір на основі їх індивідуальних потреб та задач.

Список літератури:

1. WHO: 1 in 4 people projected to have hearing problems by 2050. URL: <https://www.who.int/news/item/02-03-2021-who-1-in-4-people-projected-to-have-hearing-problems-by-2050> (дата звернення 02.09.2023).
2. Launch of the World Report on Hearing. URL: <https://www.who.int/news-room/events/detail/2021/03/03/default-calendar/launch-of-the-world-report-on-hearing> (дата звернення 02.09.2023).
3. Лихошерстов Д.О., Лебедев Д.Ю. *Аналіз сучасних систем розпізнавання дактильної-жестової мови для систем сурдоперекладу*. Вчені записки ТНУ імені В.І. Вернадського. URL: <https://doi.org/10.32838/2663-5941/2021.6/07> (дата звернення 02.09.2023).
4. Лихошерстов Д.О., Лебедев Д.Ю. *Порівняльний аналіз шляхів визначення зображення на відео ряді засобами машинного навчання*. URL: <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2022.5/03> (дата звернення 02.09.2023).
5. Video Relay Service (VRS). URL: <https://www.fcc.gov/vrs> (дата звернення 02.09.2023).
6. Video Remote Interpreting (VRI). URL: <https://www.washington.edu/doit/what-video-remote-interpreting> (дата звернення 02.09.2023).
7. Telecommunications Relay Services (TRS). URL: <https://www.fcc.gov/trs> (дата звернення 02.09.2023).
8. Professional & AI-Based Captions for Deaf & HoH | Ava. URL: <https://www.ava.me/> (дата звернення 02.09.2023).
9. Google Live Transcribe. URL: <https://transkriptor.com/> (дата звернення 02.09.2023).
10. Dragon Anywhere. URL: <https://www.nuance.com/dragon/dragon-anywhere.html> (дата звернення 02.09.2023).
11. Gboard (Google Keyboard) with ASL Stickers. URL: <https://uk.wikipedia.org/wiki/Gboard> (дата звернення 02.09.2023).
12. Signily Keyboard. URL: <https://aslized.org/innovations/signily/> (дата звернення 02.09.2023).
13. American Sign Language (ASL). URL: <https://www.nidcd.nih.gov/health/american-sign-language> (дата звернення 02.09.2023).
14. Sorenson Video Relay Service (SVRS). URL: <https://sorenson.com/vrs/> (дата звернення 02.09.2023).
15. Be My Eyes. URL: <https://www.bemyeyes.com/> (дата звернення 02.09.2023).
16. RogerVoice. URL: <https://rogervoice.com/en/> (дата звернення 02.09.2023).
17. Google Meet – Online Video Calls, Meetings and Conferencing. URL: <https://meet.google.com/> (дата звернення 02.09.2023).
18. Microsoft Teams. URL: <https://www.microsoft.com/uk-ua/microsoft-teams/log-in/> (дата звернення 02.09.2023).
19. InterpreterNow. URL: <https://signvideo.co.uk/> (дата звернення 02.09.2023).
20. Spreadthesign. URL: <https://www.spreadthesign.com/uk.ua/search/> (дата звернення 02.09.2023).
21. Marlee Signs. URL: <https://www.marleematlin.net/app/> (дата звернення 02.09.2023).
22. SignSchool: Learn ASL for Free. URL: <https://www.signschool.com/> (дата звернення 02.09.2023).
23. ASL Coach. URL: <https://www.youtube.com/watch?v=7n-K0WmjigM> (дата звернення 02.09.2023).
24. Hand Talk. URL: <https://www.handtalk.me/en/app/> (дата звернення 02.09.2023).
25. Greta application. URL: <https://play.google.com/store/apps/details?id=com.pack1.deafcommunication&hl=en> (дата звернення 02.09.2023).

Lykshosherstov D.O., Lebedev D.Yu. COMPARATIVE ANALYSIS OF DIGITAL SIGN LANGUAGE INTERPRETATION TOOLS

In recent years, there has been significant progress in the development, adaptation, and implementation of sign language interpretation systems in society to simplify the lives of people with hearing and speech impairments.

The article provides a comparative analysis of sign language interpretation systems aimed at identifying the advantages and disadvantages of each system for improving communication for people with hearing impairments. An analysis of current research and approaches presented in various applications, plug-ins, or extensions for applications regarding the functionality of current sign language interpretation systems based on smartphones, personal computers, and individual hardware and software solutions was performed. The research analyzed several solutions that use conceptually different approaches to sign language interpretation. The most popular approach is the use of live sign language interpreters, who can be either professional specialists or volunteers. A relevant solution is to use ready-made sign databases for the most popular sign languages, where it is possible to provide translation for inexperienced users. The most modern approach is to use video image recognition and artificial intelligence technologies.

Unfortunately, the actual number of unique solutions and, accordingly, software implementations in the form of applications do not allow us to fully assess the problems of sign language interpretation, but according to current research, this is not the main criterion of the study.

Key words: *sign language interpretation, gestures, deafblind, smartphone, application, artificial intelligence, comparative analysis.*

Лісовець С.М.

Таврійський національний університет імені В.І. Вернадського

ВИКОРИСТАННЯ ЦИФРОВОГО ПІД-РЕГУЛЯТОРА В КОНТУРІ КЕРУВАННЯ ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНИМ ПРИВОДОМ ПРОМИСЛОВОГО РОБОТА

Промислові роботи-маніпулятори знаходять все більш широке застосування в різних галузях промисловості. Особливо це стосується галузей, де необхідно постійно виконувати монотонні операції, які одночасно потребують і точності, і швидкодії. Типові роботи-маніпулятори мають від трьох до шести ланок, які можуть рухатися одна відносно іншої (сусідньої) за рахунок здійснення повороту або переміщення. Звичайно в якості приводів для здійснення таких рухів використовуються електромеханічні приводи, в яких застосовуються двигуни постійного або змінного струмів. Але часто є потреба в розробці нових, нестандартних електромеханічних приводів в умовах, коли доступ до технічної документації на сучасні розробки в області робототехніки є відсутнім або його складно отримати. У виконаному дослідженні на прикладі електричного двигуна постійного струму з типовими для електромеханічних приводів параметрами і відповідною типовою передатною функцією розглядалося використання цифрового ПІД-регулятора в якості регулятора кутової швидкості. При цьому, для спрощення моделі такого двигуна, не були враховані нелінійності його механічних, електричних, магнітних характеристик тощо (з практичної точки зору таке спрощення є допустимим). При розрахунку настроювання цифрового ПІД-регулятора передбачалася компенсація полюсів передатної функції електричного двигуна постійного струму його нулями за умови, що перерегулювання перехідного процесу не буде більше заданого. Також у виконаному дослідженні наводяться результати симуляції моделі контуру керування електромеханічним приводом в Simulink, яка проводилася шляхом використання в законі керування спочатку тільки пропорційної складової, а потім шляхом додавання в нього інтегруючої і диференціюючої складових. Як показала симуляція, інтегруюча складова дозволяє отримати перехідний процес без усталеної помилки, а диференціююча – зменшити перерегулювання перехідного процесу.

Ключові слова: двигун постійного струму, контур керування, ланка другого порядку, передатна функція, робот-маніпулятор, цифровий ПІД-регулятор.

Постановка проблеми. В сучасній промисловості роботи (зокрема, промислові роботи-маніпулятори) все частіше і частіше використовуються для виконання різних виробничих операцій. Це стосується літако- і автомобілебудування, виготовлення електронних виробів, обробки металів і пластмас, переробки сільськогосподарської продукції і так далі. Одним з показників, який визначає ступінь розвитку промисловості певної країни з точки зору роботизації, є питома щільність роботів на тисячу працюючих.

Найбільш затребуваними промисловими роботами на теперішній час є роботи-маніпулятори, які використовуються для зварювання, пайки, різання, фарбування, шліфування і так далі. Основні сучасні тенденції у використанні промислових роботів-маніпуляторів: зменшення вартості, збільшення області використання, покращення механізмів захоплення, удосконалення технічного зору, підвищення безпеки і, як наслідок цього, можливість

виконувати виробничі завдання в одному робочому просторі з людьми. В якості приводів таких роботів-маніпуляторів найчастіше використовуються електромеханічні приводи, в яких застосовуються двигуни постійного струму із збудженням від постійних магнітів та двигуни змінного струму асинхронні з короткозамкненим ротором і синхронні із збудженням від постійних магнітів.

Спрощена структура контуру керування електромеханічним приводом промислових роботів-маніпуляторів наведена на рис. 1.

В ній можна виділити внутрішній контур керування із зворотним зв'язком по кутовій швидкості в складі регулятора кутової швидкості (РКШ), електромеханічного приводу (ЕМП) і датчика кутової швидкості (ДКШ) та зовнішній контур керування із зворотним зв'язком по кутовому / лінійному положенню в складі розглянутого вище внутрішнього контуру керування, регулятора кутового / лінійного положення (РК/ЛП), шарнір-

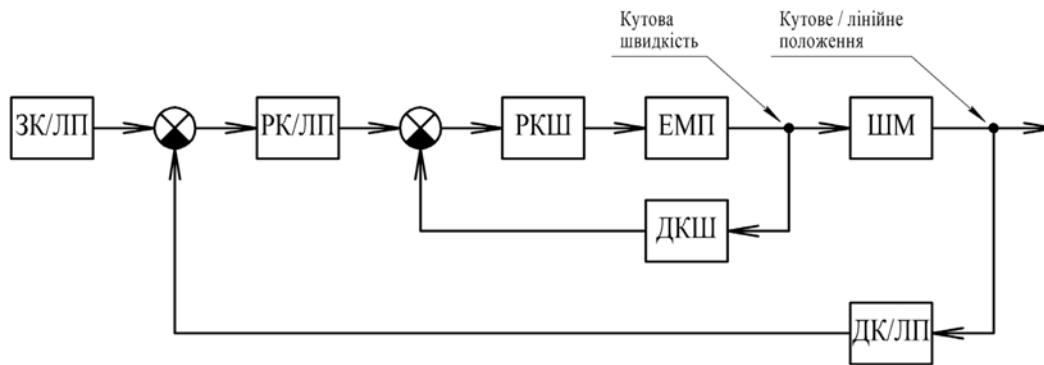


Рис. 1. Спрощена структура контуру керування електромеханічним приводом

ного механізму (ШМ), датчика кутового / лінійного положення (ДК/ЛП) і задатчика кутового / лінійного положення (ЗК/ЛП).

Відповідно до нормативної документації, керування по кутовій швидкості передбачає пропорційну залежність між сигналами на вході і на виході внутрішнього контуру керування по кутовій швидкості. Правильна робота зовнішнього контуру керування визначається переважно правильною роботою внутрішнього контуру керування. При цьому сучасні системи керування електромеханічними приводами роботів-маніпуляторів «вимагають» при позиціонуванні підвищення точності і швидкодії, покращення керованості і надійності, збільшення коефіцієнта корисної дії. В таких системах керування часто використовуються цифрові регулятори (одними з яких є цифрові ПД-регулятори) – від правильності їх роботи залежить правильність роботи всього контуру керування по кутовій швидкості.

Таким чином, синтез цифрових ПД-регуляторів для здійснення заданих впливів на кутову швидкість електромеханічних приводів є однією з актуальних задач робототехніки.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Типовим представником двигунів, які використовуються в електромеханічних приводах, є відносно застарілий, але широко розповсюджений електричний двигун постійного струму з незалежним збудженням з дисковим (пласким) якорем ПЯ-250Ф, який має вбудований тахогенератор постійного струму ТП 7520-0,2. Його технічні характеристики: напруга живлення – 36 В, номінальна частота обертання – 3000 об/хв, номінальний обертальний момент – 0,8 Н·м, номінальна потужність – 250 Вт, момент інерції якоря – $3,5 \cdot 10^{-4}$ кг·м², коефіцієнт корисної дії – 70%. Вихідна напруга тахогенератора має крутизну 0,02 В·хв/об.

Як відомо, з «точки зору» теорії автоматичного керування електричний двигун постійного струму, керування яким здійснюється шляхом зміни напруги на якорі, звичайно представляє собою ланку другого порядку (одну коливальну або дві аперіодичні, з'єднані послідовно), яка визначається трьома параметрами: електромеханічною сталою T_{EMEX} , електромагнітною сталою T_{EMAG} і коефіцієнтом передачі $K_{ДВ}$ [1, 2]. Такий опис електричного двигуна постійного струму є достатньо спрощеним, так як він, зокрема, не враховує нелінійності механічних, електричних, магнітних характеристик тощо такого двигуна. Але для багатьох режимів його роботи точність такого опису є достатньою.

Коефіцієнт передачі

$$K_{ДВ} = \frac{1}{c\Phi}, \quad (1)$$

де c – коефіцієнт, який залежить від конструкції двигуна; Φ – магнітний потік двигуна.

В свою чергу, електромеханічна стала

$$T_{EMEX} = \frac{J_{\Sigma} R_{я}}{k^2 \Phi^2}, \quad (2)$$

де J_{Σ} – сумарний момент інерції, який складається з власного моменту інерції електричного двигуна і приведенного моменту інерції від зовнішнього навантаження (наприклад, редуктора).

Звичайно приведений момент інерції більше власного моменту інерції в 1,5...2,5 рази і в процесі роботи може іноді змінюватися (наприклад, внаслідок зміни маси вантажу, який переміщує промисловий робот-маніпулятор, або положення його ланок одна відносно іншої). Внаслідок цього електромеханічна стала T_{EMEX} теж може як зменшуватися, так і збільшуватися. Типові її значення лежать в діапазоні десятків і сотень мілісекунд.

При відомих значеннях індуктивності $L_{я}$ і опору $R_{я}$ якоря електромагнітна стала

$$T_{EMAG} = \frac{L_{я}}{R_{я}} \quad (3)$$

і в процесі роботи вона є незмінною. Типові її значення лежать в діапазоні одиниць і десятків мілісекунд.

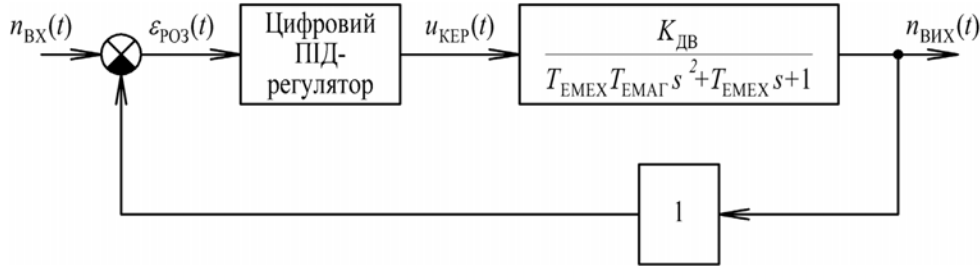


Рис. 2. Спрощена структура внутрішнього контуру керування

Таким чином, неперервна передатна функція електричного двигуна постійного струму буде наступною:

$$W(s) = \frac{K_{ДВ}}{T_{ЕМЕХ} T_{ЕМАГ} s^2 + T_{ЕМЕХ} s + 1} \quad (4)$$

З огляду на це, спрощена структура внутрішнього контуру керування із зворотним зв'язком по кутовій швидкості буде мати вигляд, наведений на рис. 2.

Інерційність датчика кутової швидкості і силової частини цифрового ПІД-регулятора при цьому будемо вважати незначними, внаслідок чого вони в розрахунках можуть не враховуватися. Як відомо, ПІД-регулятори (як неперервні, так і цифрові), реалізують пропорційно-інтегрально-диференціальний закон керування: тобто розугодження $\epsilon_{РОЗ}(t)$ (різниця між заданим $n_{ВХ}(t)$ і поточним значенням $n_{ВИХ}(t)$ керованого параметра) одночасно підсилюється, інтегрується і диференціюється, після чого результати виконання таких операцій підсумовуються з різними ваговими коефіцієнтами, формуючи потрібний керуючий вплив $u_{КЕР}(t)$ [3].

Підсилення реалізується наступним чином:

$$u_{КЕР}((k+1)\tau) = K_{П} \epsilon_{РОЗ}((k+1)\tau), \quad (5)$$

де τ – інтервал дискретизації; k – порядковий індекс, $k = 0, 1, 2, \dots$; $K_{П}$ – коефіцієнт підсилення.

Інтегрування звичайно реалізується на основі алгоритму трапецій:

$$u_{КЕР}((k+1)\tau) = u_{КЕР}(k\tau) + K_{І} \tau \frac{\epsilon_{РОЗ}((k+1)\tau) + \epsilon_{РОЗ}(k\tau)}{2}, \quad (6)$$

де $K_{І}$ – коефіцієнт інтегрування.

А диференціювання – на основі алгоритму обчислення похідної по двом точкам:

$$u_{КЕР}((k+1)\tau) = K_{Д} \frac{\epsilon_{РОЗ}((k+1)\tau) - \epsilon_{РОЗ}(k\tau)}{\tau}, \quad (7)$$

де $K_{Д}$ – коефіцієнт диференціювання.

Таким чином, дискретна передатна функція цифрового ПІД-регулятора буде наступною:

$$C(z) = K_{П} + K_{І} \frac{\tau(z+1)}{2(z-1)} + K_{Д} \frac{z-1}{\tau z}. \quad (8)$$

Для того, щоб керуючий вплив $u_{КЕР}(t)$ на інтервалі дискретизації τ залишався незмінним, використовується фіксатор нульового порядку, неперервна передатна функція якого має наступний вигляд:

$$H(s) = \frac{1 - e^{-s\tau}}{s}. \quad (9)$$

Для різних електричних двигунів постійного струму параметри $K_{ДВ}$, $T_{ЕМЕХ}$ і $T_{ЕМАГ}$ мають різне значення. Тому можна, в якості прикладу, розглянути двигун з типовими значеннями таких параметрів.

Постановка завдання. Завдання проведеного дослідження полягало в тому, щоб навести методику синтезу цифрового ПІД-регулятора, яка б дозволяла шляхом проведення нескладних розрахунків визначати оптимальні значення коефіцієнтів підсилення, інтегрування і диференціювання такого регулятора з метою його подальшого використання в контурі керування електромеханічним приводом промислового робота.

Виклад основного матеріалу дослідження.

Нехай, наприклад, $K_{ДВ} = 6$ рад/(В·с), $T_{ЕМЕХ} = 0,2$ с, $T_{ЕМАГ} = 0,01$ с і $\tau = 0,02$ с. Звідси передатна функція $G(s)$ неперервної частини (тобто електричного двигуна постійного струму разом з фіксатором нульового порядку) внутрішнього контуру керування із зворотним зв'язком по кутовій швидкості буде наступною:

$$G(s) = W(s)H(s) = \frac{K_{ДВ}(1 - e^{-s\tau})}{(T_{ЕМЕХ}T_{ЕМАГ}s^2 + T_{ЕМЕХ}s + 1)s} = \frac{6(1 - e^{-0,02s})}{(0,002s^2 + 0,2s + 1)s}. \quad (10)$$

Розкладемо передатну функцію $G(s)$ на окремі дробки:

$$G(s) = \frac{6,354102(1 - e^{-0,02s})}{(0,189443s + 1)s} - \frac{0,354102(1 - e^{-0,02s})}{(0,010557s + 1)s}. \quad (11)$$

Виконаємо над такою передатною функцією пряме z -перетворення. Звідси отримана дискретна передатна функція $G(z)$ буде такою:

$$G(z) = \frac{z-1}{z} Z\{G(s)\} =$$

$$\begin{aligned}
 &= \frac{z-1}{z} Z \left\{ \frac{6,354102(1-e^{-0,02s})}{(0,189443s+1)s} - \frac{0,354102(1-e^{-0,02s})}{(0,010557s+1)s} \right\} = \\
 &= \frac{0,636624}{z-0,899809} - \frac{0,300843}{z-0,150404} = \frac{0,335781z+0,174951}{(z-0,899809)(z-0,150404)} = \\
 &= \frac{0,335781z+0,174951}{z^2-1,050213z+0,135335} \quad (12)
 \end{aligned}$$

Таким чином, вона має два полюси $z_1 = 0,899809$ і $z_2 = 0,150404$. Для симуляції роботи внутрішнього контуру керування із зворотним зв'язком по кутовій швидкості було використано пакет Simulink і розроблено відповідну модель, яка наведена на рис. 3.

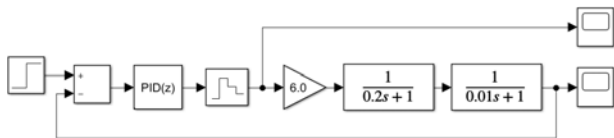


Рис. 3. Модель внутрішнього контуру керування

В такій моделі використовувався цифровий ПД-регулятор $PID(z)$, який дозволяв незалежно одне від одного використовувати підсилення, інтегрування і диференціювання. Наприклад, використовуючи тільки П-складову (без І-складової і Д-складової) такого регулятора, можна було реалізувати тільки підсилення (відповідно, без інтегрування і диференціювання). Крім того, було прийнято, що $n_{\text{вх}}(t) = 50$ об/с і в процесі симуляції не змінюється.

Перехідний процес при використанні тільки П-закону керування (при $K_{\text{п}} = 1$) у внутрішньому контурі керування із зворотним зв'язком по кутовій швидкості в пакеті Simulink наведено на рис. 4, графік 1.

Видно, що замість усталених обертів 50 об/с такий регулятор міг забезпечити тільки усталені оберти 42,86 об/с (усталена помилка 7,14 об/с), причому перерегулювання вже становило 9,99%. Зменшення $K_{\text{п}}$ до, наприклад, 0,5 приводить до зменшення перерегулювання, але при цьому збільшується усталена помилка (див. рис. 4, графік 2). Збільшення ж $K_{\text{п}}$ до, наприклад, 2 приводить до зменшення усталеної помилки, але при цьому збільшується перерегулювання (див. рис. 4, графік 3).

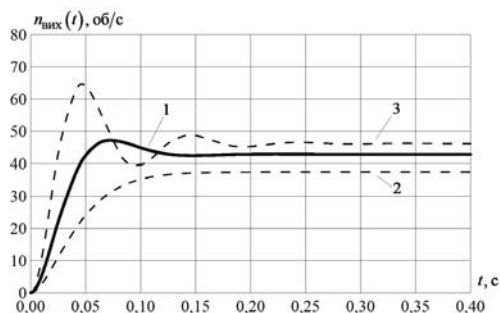


Рис. 4. Перехідний процес при використанні тільки П-закону керування

Зменшити до нуля усталену помилку можливо, якщо додати до П-складової І-складову [4]. Отже, передатна функція внутрішнього контуру керування із зворотним зв'язком по кутовій швидкості (в розімкненому стані) буде наступною:

$$\begin{aligned}
 C(z)G(z) &= (K_{\text{п}} + K_{\text{І}} \frac{\tau(z+1)}{2(z-1)}) \frac{0,335781z+0,174951}{(z-0,899809)(z-0,150404)} = \\
 &= \frac{(2K_{\text{п}} + K_{\text{І}}\tau) \left(z + \frac{K_{\text{І}}\tau - 2K_{\text{п}}}{2K_{\text{п}} + K_{\text{І}}\tau} \right)}{2(z-1)} \frac{0,335781z+0,174951}{(z-0,899809)(z-0,150404)} \quad (13)
 \end{aligned}$$

Компенсуємо один з полюсів $G(z)$ (нехай це буде полюс, більший за модулем) нулем $C(z)$:

$$z + \frac{K_{\text{І}}\tau - 2K_{\text{п}}}{2K_{\text{п}} + K_{\text{І}}\tau} = z - z_1, \quad (14)$$

звідси

$$K_{\text{І}} = K_{\text{п}} \frac{2 - 2z_1}{\tau(z_1 + 1)}. \quad (15)$$

Обираючи певні значення $K_{\text{п}}$, можна однозначно визначати $K_{\text{І}}$. Перехідний процес при використанні тільки ПІ-закону керування (при $K_{\text{п}} = 1$) у внутрішньому контурі керування із зворотним зв'язком по кутовій швидкості в пакеті Simulink наведено на рис. 5, графік 1.

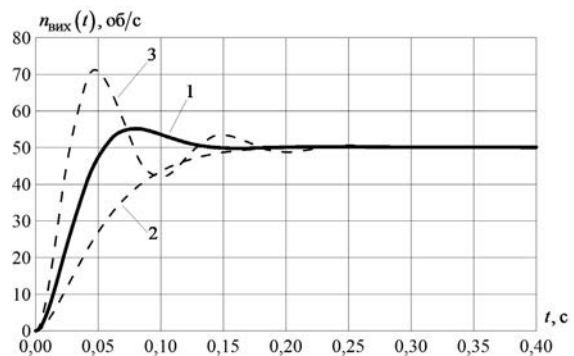


Рис. 5. Перехідний процес при використанні тільки ПІ-закону керування

Як можна було побачити, усталена помилка дійсно відсутня, але перерегулювання є достатньо великим (10,26%). Зменшення $K_{\text{п}}$ до 0,5 приводить до зменшення перерегулювання, але при цьому збільшується час регулювання (рис. 5, графік 2). І навпаки, при збільшенні $K_{\text{п}}$ до 2 перерегулювання різко збільшується.

Зменшити перерегулювання можливо, якщо додати до П- і І-складових Д-складову [4]. Отже, передатна функція внутрішнього контуру керування із зворотним зв'язком по кутовій швидкості (в розімкненому стані) буде наступною:

$$\begin{aligned}
 C(z)G(z) &= (K_{\text{п}} + K_{\text{І}} \frac{\tau(z+1)}{2(z-1)} + K_{\text{Д}} \frac{z-1}{\tau z}) \frac{0,335781z+0,174951}{(z-0,899809)(z-0,150404)} = \\
 &= \frac{(2K_{\text{п}}\tau + K_{\text{І}}\tau^2 + 2K_{\text{Д}})z^2 + (-2K_{\text{п}}\tau + K_{\text{І}}\tau^2 - 4K_{\text{Д}})z + 2K_{\text{Д}}}{2\tau z(z-1)}
 \end{aligned}$$

$$\times \frac{0,335781z + 0,174951}{(z - 0,899809)(z - 0,150404)}. \quad (16)$$

Компенсуємо обидва полюси $G(z)$ нулями $C(z)$:

$$z^2 + \frac{-2K_{\text{п}}\tau + K_1\tau^2 - 4K_{\text{д}}}{2K_{\text{п}}\tau + K_1\tau^2 + 2K_{\text{д}}}z + \frac{2K_{\text{д}}}{2K_{\text{п}}\tau + K_1\tau^2 + 2K_{\text{д}}} = (z - z_1)(z - z_2).$$

Отримане рівняння є квадратним рівнянням, в яке входить три незалежних коефіцієнти $K_{\text{п}}$, K_1 і $K_{\text{д}}$. Таким чином (так само як і у випадку з ПІ-регулятором), обираючи певні значення $K_{\text{п}}$, можна однозначно визначити K_1 і $K_{\text{д}}$.

Перехідний процес при використанні ПІД-закону керування (при $K_{\text{п}} = 1$, $K_1 = 5,18$ с, $K_{\text{д}} = 0,00329$ с) у внутрішньому контурі керування із зворотним зв'язком по кутовій швидкості в пакеті Simulink наведено на рис. 6, графік 1.

Порівнюючи графіки 1 на рис. 5 і рис. 6 можна побачити, що додавання в ПІД-закон керування Д-складової не дуже суттєво, але все ж таки помітно зменшує як перерегулювання, так і час регулювання (зокрема, перерегулювання зменшилося з 10,26 до 4,65 %).

При зменшенні значення $K_{\text{п}}$ перехідний процес приймає все більш аперіодичний характер, і вплив Д-складової стає все менш помітним.

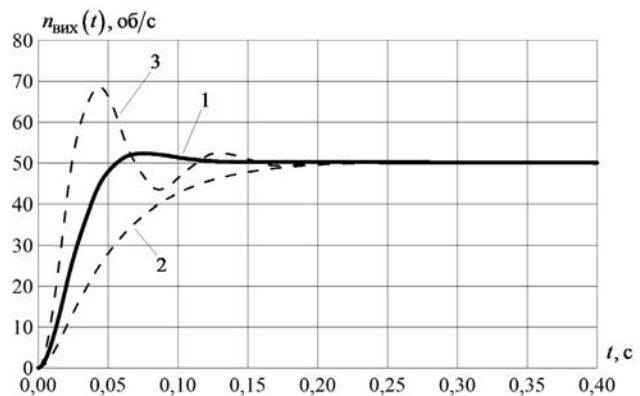


Рис. 6. Перехідний процес при використанні ПІД-закону керування

І навпаки, збільшення значення $K_{\text{п}}$ приводить до більш коливального перехідного процесу, а зменшення перерегулювання стає більш помітним.

Висновки. Проведене дослідження показало, що при правильному проведенні розрахунків цифровий ПІД-регулятор може конкурувати з аналогічними аналоговими ПІД-регуляторами і може бути використаний для керування електромеханічним приводом промислового робота.

Список літератури:

1. Ткачук В.І. Теорія та синтез вентильних двигунів постійного струму / В.І. Ткачук, І.Є. Біляковський, О.В. Макаручук, Л.В. Каша, О.В. Грещук. Львів: Видавництво Львівської політехніки, 2011. 288 с.
2. Електропривод: Підручник / Ю.М. Лавріненко, О.С. Марченко, П.І. Савченко, О.Ю. Синівський, Д.Г. Войтюк, В.П. Лисенко; За ред. Ю.М. Лавріненка. К.: Видавництво «Ліра-К», 2009. 504 с.
3. Гоголюк П.Ф. Теорія автоматичного керування. Навч. посіб. / П.Ф. Гоголюк, Т.М. Гречин. Львів: Видавництво Львівської політехніки, 2009.
4. Benjamin C. Kuo. Digital Control Systems (The Oxford Series in Electrical and Computer Engineering). Oxford University Press; 2nd edition (June 1, 1995). 784 pages.

Lisovets S.M. USE OF DIGITAL PID REGULATOR IN CONTROL CIRCUIT OF ELECTROMECHANICAL DRIVE OF INDUSTRIAL ROBOT

Industrial robot manipulators are becoming more and more widely used in various industries. This is especially true for industries where monotonous operations need to be performed at all times, which simultaneously require both accuracy and speed. Typical robot manipulators have three to six links that can move relative to each other (adjacent) by rotating or moving. Of course, electromechanical drives are used as drives for such movements, in which DC or AC motors are used. But there is often a need to develop new, non-standard electromechanical drives in conditions when access to technical documentation for modern developments in the field of robotics is absent or difficult to obtain. In the performed study, using the example of an electric DC motor with parameters typical for electromechanical drives and the corresponding typical transmission function, the use of a digital PID regulator as an angular velocity regulator was considered. At the same time, in order to simplify the model of such an engine, the nonlinearities of its mechanical, electrical, magnetic characteristics, etc. were not taken into account (from a practical point of view, such a simplification is permissible). When calculating the adjustment of the digital PID regulator, it was assumed to compensate the poles of the transmission function of the DC electric motor with its zeros, provided that the re-regulation of the transition process will not be more than the specified one. Also, the performed study provides the results of simulation of the electromechanical drive loop model in Simulink, which was carried out by using only a proportional component in the control law, and then by adding integrating and differentiating components to it. As the simulation showed, the integrating component allows you to obtain a transition process without an established error, and the differentiating one to reduce the rearrangement of the transition process.

Key words: DC motor; control loop, second order link, transmission function, robot-manipulator; digital PID controller.

Ляшенко О.М.

Херсонський національний технічний університет

Кириичук Д.Л.

Херсонський національний технічний університет

Дзюба А.В.

Херсонський національний технічний університет

Фролова М.Е.

Херсонський національний технічний університет

Прачик В.В.

Херсонський національний технічний університет

ПРОЕКТУВАННЯ, МОДЕЛЮВАННЯ ТА РОЗРОБЛЕННЯ ПРОГРАМНОГО КОМПЛЕКСУ З ОБЛІКУ КОМП'ЮТЕРНОГО ОБЛАДНАННЯ

У роботі розроблено програмний комплекс з обліку комп'ютерного обладнання. Програмний комплекс з обліку комп'ютерного обладнання – це комплекс інтегрованих програм і засобів, що реалізує набір взаємопов'язаних функцій предметної області в заданому середовищі.

Програмний комплекс дозволяє вести облік комп'ютерного обладнання на підприємстві (офісної техніки, принтерів, облік оргтехніки, облік програмного забезпечення, комплектуючих, витратних матеріалів та будь-якої іншої техніки та іншого інвентарю). Облік комп'ютерної техніки ведеться у межах підприємства та його філій.

До функціональних особливостей програмного комплексу можна віднести такі: облік комп'ютерного обладнання, підтримку бази даних MySQL, роботу з великими обсягами даних, високу швидкість роботи, багатокористувацький режим роботи, прикріплення зображень та файлів до будь-яких об'єктів обліку, ведення історії змін ключових полів об'єктів обліку, облік ремонтів та профілактичних обслуговувань обладнання та комп'ютерів, наявність великої кількості вбудованих друкованих форм та звітів з можливістю їх редагування, імпорт даних із Excel/CSV файлів.

Програмний комплекс розроблено для адміністраторів, співробітників IT-відділів та їх керівників, завідувачів складів та всіх, кому необхідно мати чітку та актуальну картину стану парку комп'ютерного обладнання.

Для розроблення програмного комплексу з обліку комп'ютерного обладнання було використано інтегроване середовище розробки Apache NetBeans та мову Java.

Для розроблення інтерфейсу користувача було використано бібліотеку Java Swing. Swing – це бібліотека JAVA Foundation JFC та розширення набору інструментів Abstract Window AWT.

Для проектування, моделювання та розроблення бази даних програмного комплексу з обліку комп'ютерного обладнання було використано MySQL Workbench.

Ключові слова: програмний комплекс, облік комп'ютерного обладнання, середовище розробки Apache NetBeans, мова Java.

Постановка проблеми. Нині практично відсутній огляд сучасних теоретико-методологічних підходів до проектування, моделювання та розроблення програмних комплексів з обліку комп'ютерного обладнання на підприємствах малого та середнього бізнесу, а також шляхів подальшого розвитку таких програм.

Таким чином, проектування, моделювання та розроблення програмного комплексу є актуальною науково-прикладною задачею, а його побу-

дова потребує виявлення та аналізу сучасних тенденцій розвитку та застосування таких програм, насамперед, на основі провідних наукових публікацій.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. В роботі [1] розглянуто питання та проблеми впровадження програмних продуктів для автоматизації бухгалтерського обліку та управління, для підвищення ефективності діяльності підприємства, а також висвітлені проблеми вибору

найбільш функціонального програмного забезпечення бухгалтерського обліку підприємства.

В роботі [2] розглянуто актуальні теоретико-прикладні питання автоматизації бухгалтерського обліку на основі інформаційних технологій і систем як елементів організаційно-управлінських інновацій. Визначено теоретико-методологічні основи й практичний інструментарій застосування сучасних інформаційних технологій та систем у бухгалтерському обліку та зміни в ньому зумовлені застосуванням цих технологій. Уточнено понятійний апарат. Описано мету, завдання, принципи та методологію створення автоматизованих систем бухгалтерського обліку, організації облікового процесу, автоматизації технологічних операцій, структуризації та постановки облікових задач.

В роботі [3] проведено якісну та кількісну оцінку переваг та недоліків програм автоматизації бухгалтерського обліку на основі контент-аналізу та статистичного аналізу інтеграції інформаційних систем у практиці українських підприємств. Визначено три ключові тенденції в сфері автоматизації бухгалтерського обліку, які ведуть до скорочення кількості недоліків та проблем при автоматизації. Встановлено, що на внутрішньому ринку України збільшується кількість підприємств, які використовують програми автоматизації бухгалтерського обліку. Це призводить до розвитку ринку надання послуг з розробки, підтримки, супроводу, налаштування програм автоматизації, зростання конкуренції серед компаній-розробників, постачальників послуг.

В роботі [4] описано інформаційну систему бухгалтерського обліку, яку розроблено власними силами Німецького йорданського університету. Інформаційна система – це розподілена веб-програма, яка складається з трьох окремих рівнів: клієнтського, веб-рівня (програма) та бізнес-рівня (дані). Три рівні розроблено таким чином, щоб система була простою у використанні, ефективною, швидкою, точною, надійною та масштабованою. Інформаційна система переважно дозволяє бухгалтерам керувати щоденними фінансовими операціями, такими як платежі, відшкодування та коригування.

В роботі [5] розроблено систему цифрового обліку, яка обробляє та зберігає облікову базу даних у хмарній системі. Система є альтернативним варіантом для всіх типів підприємств – від малих і середніх підприємств до великих фірм. Для коректної роботи необхідно отримати доступ на використання цифрової системи бухгалтерського обліку в службі хмарних обчислень. Для

розробки системи було використано мову PHP, а для зберігання даних – базу даних MySQL.

Метою статті є проектування, моделювання та розроблення програмного комплексу з обліку комп'ютерного обладнання.

Виклад основного матеріалу. Програмний комплекс з обліку комп'ютерного обладнання – це комплекс інтегрованих програм і засобів, що реалізує набір взаємопов'язаних функцій предметної області в заданому середовищі.

Архітектуру програмного комплексу з обліку комп'ютерного обладнання подано на рис. 1.

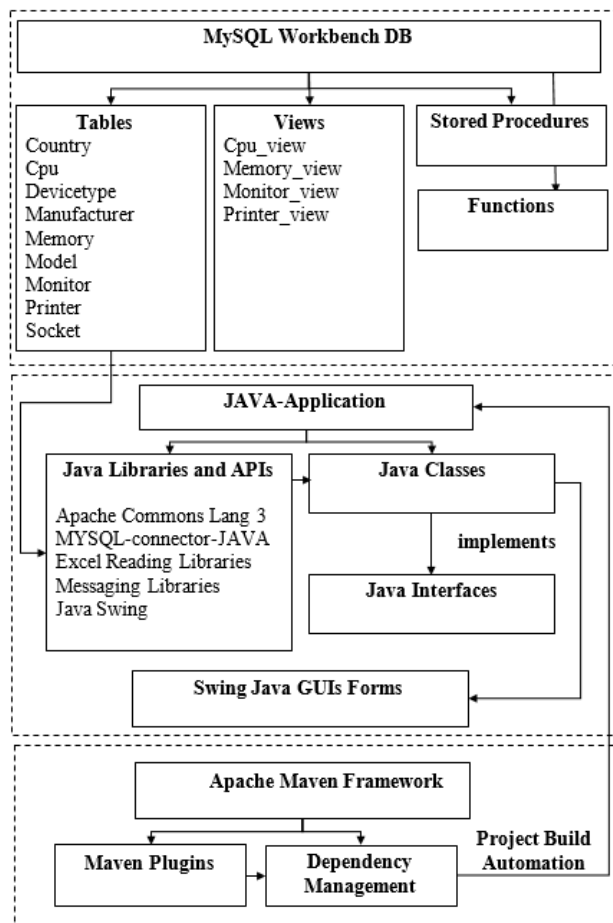


Рис. 1. Архітектура програмного комплексу з обліку комп'ютерного обладнання

У комплекс входять: прикладні системи (Apache NetBeans for Java, Java-Application), загальносистемні програмні засоби (СКБД MySQL Workbench), спеціалізовані програмні засоби для автоматизації складання проекту та для реалізації функцій захисту інформації, забезпечення безпеки (Apache Maven Framework)

Програмний комплекс дозволяє вести облік комп'ютерного обладнання на підприємстві. Облік ведеться у межах підприємства та його філій.

До функціональних особливостей програмного комплексу можна віднести такі:

1. Облік комп'ютерного обладнання (офісної техніки, принтерів, облік оргтехніки, облік програмного забезпечення, комплектуючих, витратних матеріалів та будь-якої іншої техніки та іншого інвентарю).
2. Підтримка бази даних MySQL. Робота з великими обсягами даних.
3. Висока швидкість роботи, навіть, якщо в базі даних сотні філій і сотні тисяч одиниць техніки, що обліковуються.
4. Багатокористувацький режим роботи – всі філії працюють з єдиною базою даних з розмежуванням прав доступу.
5. Можливість створення та налаштування власних додаткових властивостей різних типів.
6. Прикріплення зображень та файлів до будь-яких об'єктів обліку.
7. Ведення історії змін ключових полів об'єктів обліку.
8. Облік ремонтів та профілактичних обслуговувань обладнання та комп'ютерів.
9. Облік витратних матеріалів, комплектуючих запчастин, канцелярії.
10. Ведення бази постачальників, сервісних організацій та інших контрагентів.
11. Велика кількість вбудованих друкованих форм та звітів з можливістю їх редагування.
12. Імпорт даних із Excel/CSV файлів.

Діаграму варіантів використання програмного комплексу з обліку комп'ютерного обладнання подано на рис. 2.

Для розроблення БД програмного комплексу було використано реляційну систему керування базами даних MySQL та MySQL Workbench – інструмент для візуального проектування баз даних, що інтегрує проектування, моделювання, створення та експлуатацію БД у єдине безшовне оточення для системи баз даних MySQL.

Структуру БД у MySQL Workbench подано на рис. 3.

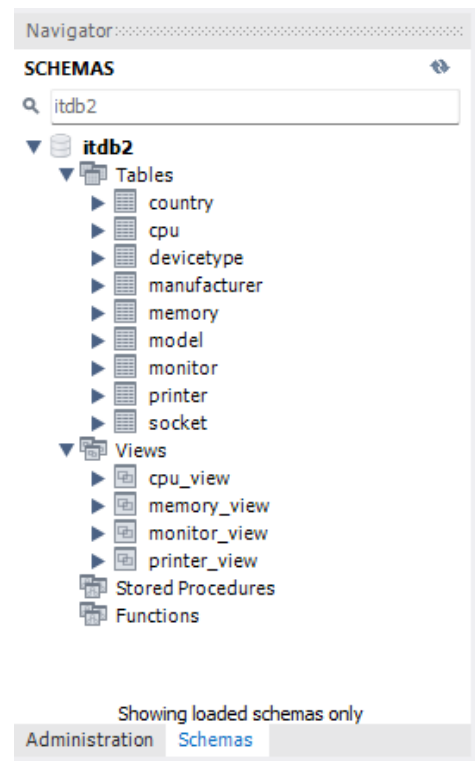


Рис. 3. Структура БД у MySQL Workbench

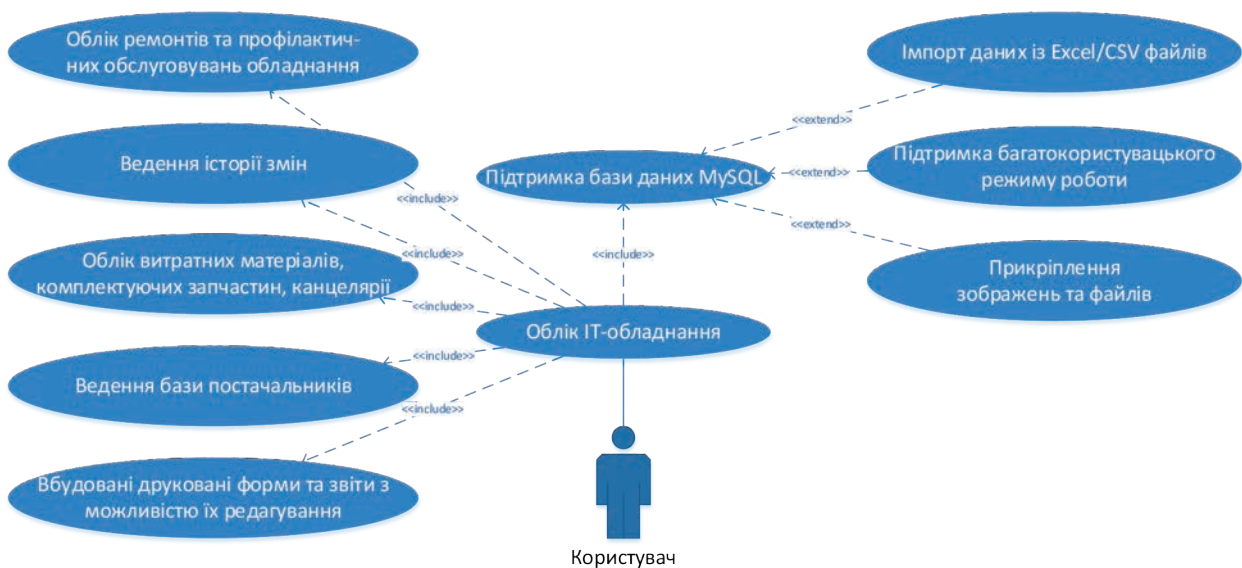


Рис. 2. Діаграма варіантів використання програмного комплексу

Схему БД з обліку комп'ютерного обладнання подано на рис. 4.

База даних з обліку ІТ-обладнання містить 9 таблиць: «cpu», «manufacturer», «socket», «country», «model», «memory», «devicetype», «printer», «monitor».

Таблиця «manufacturer» зберігає назву виробника комп'ютерного обладнання. Таблиця «country» – країну виробника. Таблиця «devicetype» описує тип комп'ютерного обладнання. Таблиця «model» опи-

сує модель комп'ютерного обладнання. Таблиця «socket» зберігає інформацію про тип роз'єму процесора. Таблиця «cpu» описує процесор. Таблиця «memory» описує пам'ять. Таблиця «monitor» зберігає інформацію про персональний монітор. Таблиця «printer» – інформацію про принтер.

Структура БД з обліку комп'ютерного обладнання містить розділ View (рис. 5).

View – це об'єкт бази даних, що є результатом виконання запиту до бази даних, визначеного за

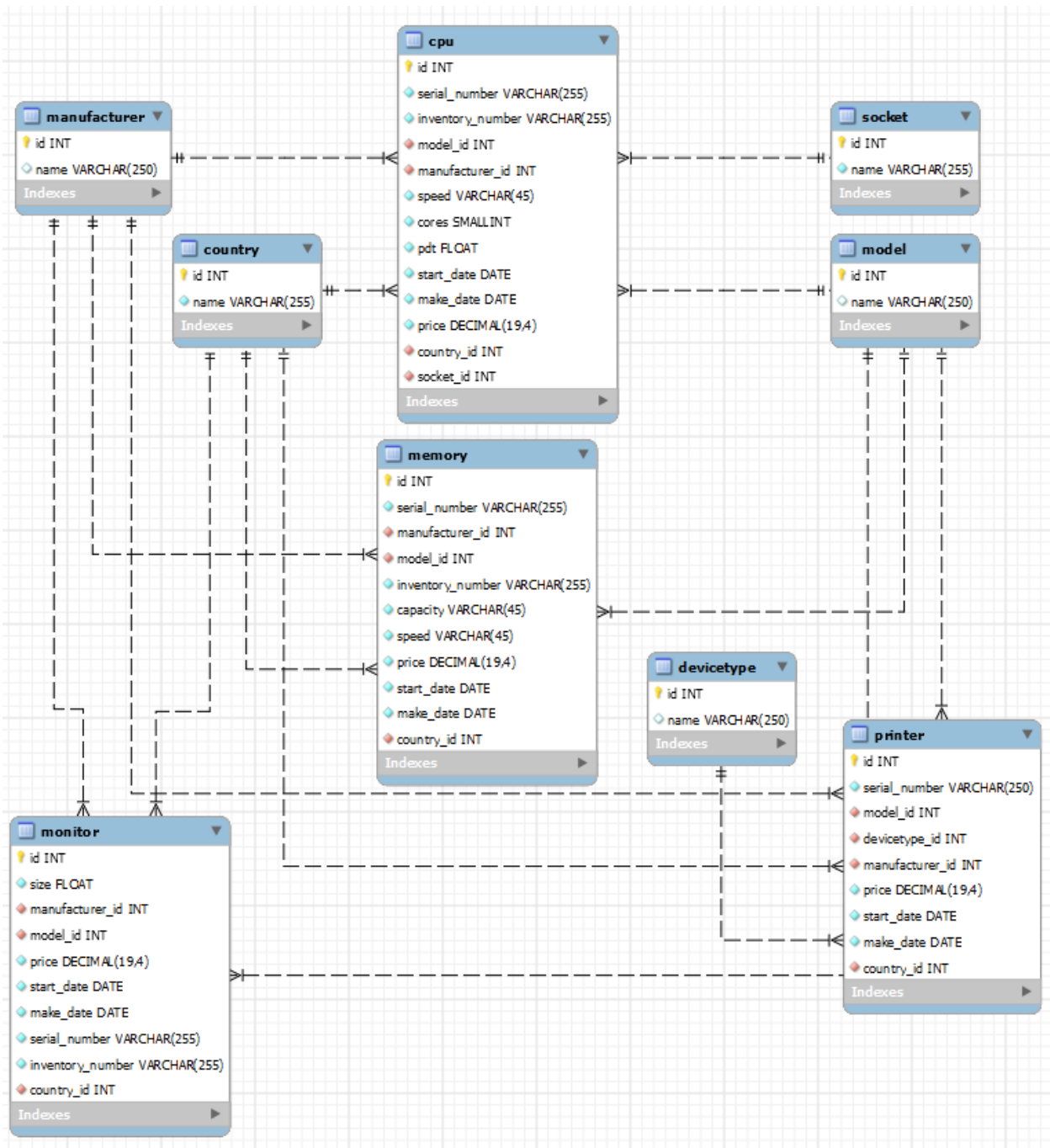


Рис. 4. Схеми БД з обліку комп'ютерного обладнання

допомогою оператора SELECT, у момент звернення до View.

Перевага використання View, порівняно з основною таблицею, в тому, що View буде модифіковано автоматично кожного разу, коли таблиця, що є його основою, змінюється. Зміст View не фіксований, і перепризначається кожного разу, коли є посилання на View в команді.

Діаграму основних класів програмного комплексу подано на рис. 6.

На рис. 6 public class DriverManager extends Object – базовий клас для керування набором драйверів JDBC. У процесі ініціалізації клас DriverManager завантажує класи драйверів, на які посилається системна властивість «jdbc.drivers». Це дозволяє налаштувати драйвери JDBC, які використовує програмний комплекс [6].

Методи DriverManager getConnection і getDrivers підтримують механізм Java Standard Edition Service Provider. Драйвери JDBC повинні містити файл META-INF/services/java.sql.Driver. Цей файл містить назву реалізації драйверів JDBC java.sql.Driver. Наприклад, щоб завантажити клас my.sql.Driver, файл META-INF/services/java.sql.Driver міститиме запис: my.sql.Driver [7].

Метод public static Connection getConnection(String url, Properties info) throws SQLException встановлює з'єднання з указаною URL-адресою бази даних. DriverManager вибирає відповідний драйвер із набору зареєстрованих драйверів JDBC.

Метод public static Connection getConnection(String url, String user, String password) throws SQLException встановлює з'єднання з указаною URL-адресою бази даних [6].

Метод public static Driver getDriver(String url) throws SQLException знаходить драйвер, який розуміє вказану URL-адресу.

Метод public static void setLoginTimeout(int seconds) встановлює максимальний час у секундах, протягом якого драйвер чекатиме під час спроби підключитися до бази даних після ідентифікації драйвера.

Метод public static PrintWriter getLogWriter() отримує запис журналу.

Клас Statement Statement призначено для виконання SQL-запитів без параметрів; містить базові методи для виконання запитів та отримання результатів.

Конструктор Statement(Object target, String methodName, Object[] arguments) створює новий об'єкт Statement для вказаного цільового об'єкта, щоб викликати метод, вказаний у methodName і масиву аргументів Object[] arguments.

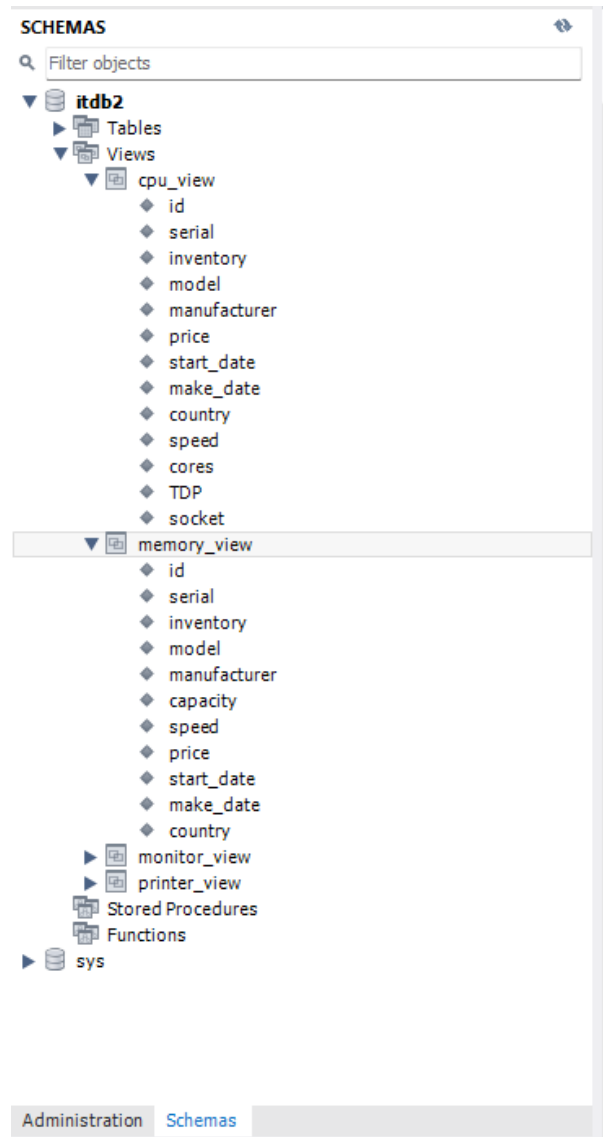


Рис. 5. Структура БД з обліку комп'ютерного обладнання. Розділ View

Клас Database user використовується для збірвання інформації про користувачів БД програмного комплексу [6, 7].

Connection – це сеанс між програмою Java і базою даних. Connection допомагає встановити зв'язок з базою даних.

Інтерфейс Connection є фабрикою Statement, PreparedStatement і DatabaseMetaData, тобто об'єкт Connection можна використовувати для отримання об'єкта Statement і DatabaseMetaData. Інтерфейс Connection надає багато методів для керування транзакціями, наприклад commit(), rollback(), setAutoCommit(), setTransactionIsolation() тощо [6]

Для розроблення програмного комплексу було використано такі методи інтерфейсу Connection [6, 7]:

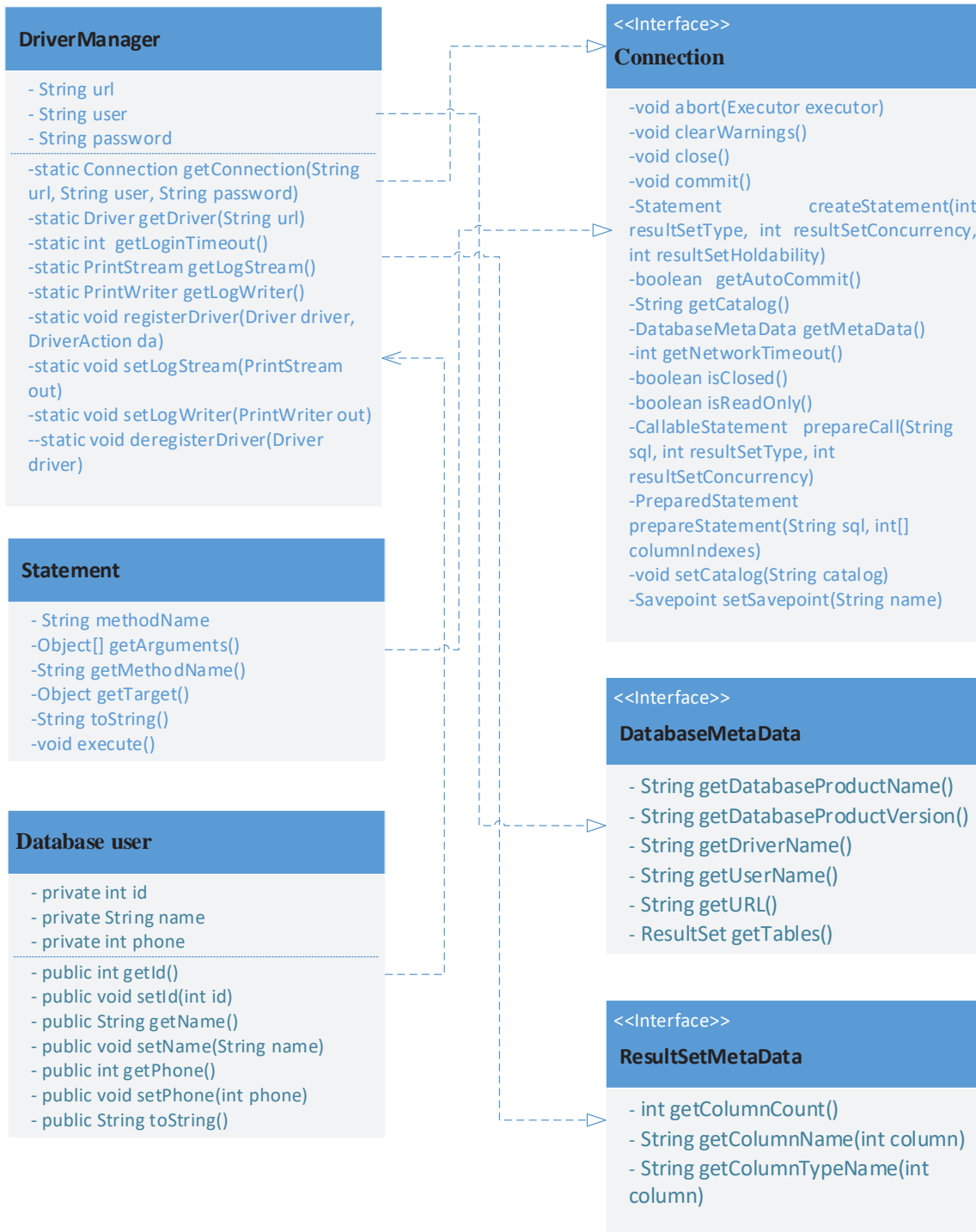


Рис. 6. Діаграма основних класів програмного комплексу

1) `public Statement createStatement()`: створює об'єкт оператора, який можна використовувати для виконання запитів SQL;

2) `public Statement createStatement(int resultSetType, int resultSetConcurrency)`: створює об'єкт Statement, який генеруватиме об'єкти ResultSet із заданим типом і паралельністю;

3) `public void setAutoCommit(boolean status)`: використовується для встановлення статусу фіксації. За замовчуванням це true;

4) `public void commit()`: зберігає зміни, внесені після того, як попередній commit/rollback є постійним;

5) `public void rollback()`: скидає всі зміни, зроблені з попереднього commit/rollback;

6) `public void close()`: закриває з'єднання та негайно звільняє ресурси JDBC.

Метод `Statement createStatement()` throws `SQLException` створює об'єкт Statement для над-

силання операторів SQL до бази даних. Інструкції SQL без параметрів зазвичай виконуються за допомогою об'єктів Statement. Якщо той самий оператор SQL виконується багато разів, ефективніше використовувати об'єкт PreparedStatement [6].

Метод void setAutoCommit(boolean autoCommit) throws SQLException встановлює режим автоматичного підключення з'єднання до заданого стану. Якщо підключення перебуває в режимі автоматичної фіксації, усі його оператори SQL виконуватимуться та фіксуватимуться як окремі транзакції. В іншому випадку його оператори SQL групуються в транзакції, які завершуються викликом або фіксації методу, або відкату методу. За замовчуванням нові підключення знаходяться в режимі автоматичного підключення.

Фіксація відбувається, коли оператор завершується. Час виконання оператора залежить від типу оператора SQL [6, 7]:

1. Для інструкцій DML, таких як Insert, Update або Delete, і інструкцій DDL, інструкція вважається завершеною, щойно завершується її виконання.

2. Для операторів Select оператор є завершеним, коли пов'язаний набір результатів закрито.

3. Для об'єктів CallableStatement або для інструкцій, які повертають кілька результатів, інструкція вважається завершеною, коли всі пов'язані набори результатів закрито, а всі лічильники оновлень і вихідні параметри отримано.

Метод void commit() throws SQLException робить усі зміни, внесені після попередньої commit/rollback, постійними та скасовує будь-які

блокування бази даних, які наразі зберігає цей об'єкт Connection. Exception [6].

Метод void rollback() throws SQLException скасовує всі зміни, внесені в поточну транзакцію, і знімає будь-які блокування бази даних, які наразі зберігає цей об'єкт Connection.

Метод void close() throws SQLException звільняє базу даних і ресурси JDBC об'єкта Connection, а не чекає їх автоматичного звільнення.

Метод DatabaseMetaData getMetaData() throws SQLException отримує об'єкт DatabaseMetaData, який містить метадані про базу даних, до якої цей об'єкт Connection представляє підключення. Метадані містять інформацію про таблиці бази даних, підтримувану граматику SQL, збережені процедури, можливості цього підключення тощо.

Метод PreparedStatement prepareStatement (String sql, int resultSetType, int resultSetConcurrency) throws SQLException створює об'єкт PreparedStatement, який генеруватиме об'єкти ResultSet із заданим типом і паралельністю. Цей метод такий самий, як і метод prepareStatement, але він дозволяє перевизначити тип набору результатів за замовчуванням і паралелізм.

Інтерфейс DatabaseMetaData надає методи отримання метаданих бази даних, таких як назва продукту бази даних, версія продукту бази даних, назва драйвера, назва загальної кількості таблиць, назва загальної кількості переглядів тощо [6].

ResultSetMetaData – це інтерфейс у пакеті java.sql API JDBC, який використовується для отримання метаданих про об'єкт ResultSet.

Іденти...	Серійн...	Інвента...	Модель	Виробн...	Швидкі...	Кількіст...	Систем...	Дата вв...	Дата ви...	Країна ...	Тип роз...
1	466272/1	456789...	Core i7 ...	Intel	2.9	8	Рідинн...	04.03.2...	05.02.2...	Китай	Socket ...
2	82576/1	456789...	Pentiu...	Intel	2.7	2	Рідинн...	05.02.2...	07.03.2...	Китай	Socket ...
3	102545/1	456789...	Pentiu...	Intel	3.0	2	Рідинн...	04.05.2...	03.04.2...	Китай	Socket ...
4	324069/1	456789...	A6-950...	AMD	3.5	2	Повітря...	02.03.2...	06.04.2...	TSCM T...	Socket ...
5	325115/1	456789...	Core i3-...	Intel	3.6	4	Рідинн...	06.04.2...	02.07.2...	Китай	Socket ...
6	178541...	456789...	CPU Int...	Intel	3.6	2	Повітря...	07.02.2...	04.06.2...	Китай	Socket ...
7	186128...	456789...	CPU A...	AMD	3.5	2	Повітря...	02.02.2...	08.09.2...	TSCM T...	Socket ...
8	321073/1	456789...	CPU A...	AMD	3.0	2	Повітря...	06.09.2...	08.09.2...	TSCM T...	Socket ...
9	148654...	456789...	CPU A...	AMD	3.5	2	Повітря...	05.09.2...	03.06.2...	TSCM T...	Socket ...
10	178281...	456789...	CPU Int...	Intel	3.8	4	Рідинн...	07.04.2...	01.06.2...	Китай	Socket ...
11	180472...	456789...	CPU L...	Intel	3.6	4	Рідинн...	06.07.2...	05.08.2...	Китай	Socket ...
12	512960/1	456789...	CPU Int...	Intel	3.7	4	Рідинн...	06.03.2...	08.09.2...	Китай	Socket ...
13	573664/1	456789...	CPU Int...	Intel	3.2	2	Рідинн...	02.04.2...	01.02.2...	Китай	Socket ...

Рис. 7. Робота з БД програмного комплексу

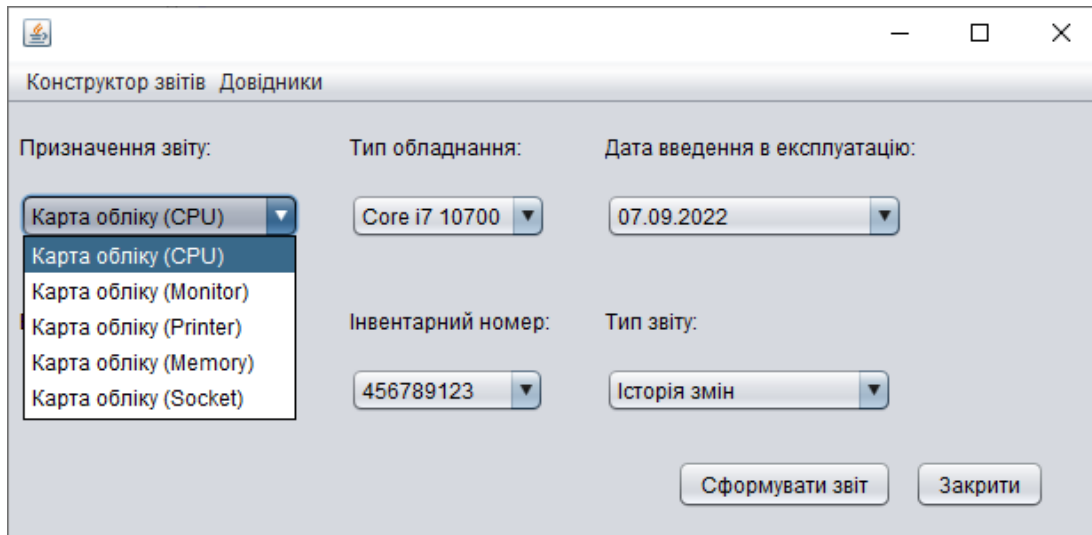


Рис. 8. Конструктор звітів



Рис. 9. Облік об'єктів

Щоразу, коли надсилається запит до бази даних за допомогою оператора SELECT, результат буде збережено в об'єкті ResultSet. Кожен об'єкт ResultSet пов'язаний з одним об'єктом ResultSetMetaData. Цей об'єкт матиме всі метадані про об'єкт ResultSet, наприклад ім'я схеми, ім'я таблиці, кількість стовпців, ім'я стовпця, тип даних стовпця тощо. Можна отримати цей об'єкт ResultSetMetaData за допомогою методу getMetaData() ResultSet [6, 7].

Методи інтерфейсу ResultSetMetaData, що були використані для роботи з БД програмного комплексу: int getColumnCount() throws SQLException повертає кількість стовпців у ResultSet. getColumnName(int column) throws SQLException повертає назву стовпця. getColumnTypeName(int column) throws SQLException повертає специфічний для бази даних тип даних стовпця [6].

Приклади роботи програмного комплексу подано на рис. 7–9.

Висновки. В роботі розроблено програмний комплекс з обліку комп'ютерного обладнання. Розроблено структуру БД програмного комплексу у MySQL Workbench, побудовано схему БД, описано структуру таблиць БД.

Для розроблення програмного комплексу було використано інтегроване середовище розробки Apache NetBeans та мову Java. Побудовано діа-

граму основних класів програмного комплексу. Побудовано діаграму варіантів використання програмного комплексу. Розроблено інтерфейс користувача. Для розроблення інтерфейсу користувача було використано бібліотеку Java Swing.

Список літератури:

1. Стригуль Л.С., Ковальов А.Г. Сучасний стан та проблеми автоматизації бухгалтерського обліку на підприємствах України. *Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Збірник наукових праць. Тематичний випуск: Технічний прогрес і ефективність виробництва*. 2010. № 61. С. 53–58.
2. Бенько М.М. Інформаційні системи і технології в бухгалтерському обліку: монографія. Київ: Національний торговельно-економічний університет, 2010. 336 с.
3. Плекан М.В., Гайдучок Т.С., Головач Г.В. Переваги та недоліки програм автоматизації бухгалтерського обліку. *Інвестиції: практика та досвід*. 2020. № 23. С. 10–15.
4. Feras Al-hawari. Analysis and Design of an Accounting Information System. *International Research Journal of Electronics and Computer Engineering*. 2017. № 3(2). С. 16–21.
5. Kriangsak Chanthinok. The Development of Digital Accounting System on Cloud Computing. *Journal of Computer Science*. 2021. № 17(10). С. 889–904.
6. Herbert Schildt. Java: The Complete Reference. McGraw Hill, 2021. 1280 с.
7. Christian Ullenboom. Java: The Comprehensive Guide to Java Programming for Professionals. Rheinwerk Computing, 2022. 1128 с.

Liashenko O.M., Kyryichuk D.L., Dziuba A.V., Frolova M.E., Prachyk V.V. DESIGN, MODELING AND DEVELOPMENT OF A COMPUTER EQUIPMENT ACCOUNTING SOFTWARE

The work developed a software for accounting computer equipment. The software for accounting for computer equipment is a complex of integrated programs and tools that implements a set of interrelated functions of the subject area in a given environment.

The software allows you to keep records of computer equipment at the enterprise (office equipment, printers, accounting of office equipment, accounting of software, components, consumables and any other equipment and other inventory). Computer equipment is recorded within the enterprise and its branches.

The functional features of the software include the following: accounting for computer equipment, support for the MySQL database, work with large amounts of data, high speed, multi-user mode of operation, attaching images and files to any accounting objects, maintaining the history of changes in key fields of accounting objects, accounting for repairs and preventive maintenance of equipment and computers, the presence of a large number of built-in printed forms and reports with the ability to edit them, import data from Excel/CSV files.

The software is designed for administrators, employees of IT-departments and their managers, warehouse managers and everyone who needs to have a clear and up-to-date picture of the state of the computer equipment fleet.

To develop a software for accounting computer equipment, the integrated development environment Apache NetBeans and the Java language were used.

Java Swing library was used to develop the user interface. Swing is a JAVA Foundation JFC library and an extension of the Abstract Window AWT toolkit.

MySQL Workbench was used to design, simulate and develop a database of software for accounting computer equipment.

Key words: *software, computer hardware accounting, Apache NetBeans development environment, Java language.*

Maidan M.V.

Lviv Polytechnic National University

IOT DEVICES PROCESSORS SYNTHESIS IN EDGE COMPUTING: APPROACH ANALISES

Modern approaches to organizing the infrastructure of the Internet of Things (IoT) network have been studied. IoT is a global network of physical devices that can interact with each other and the cloud, exchange data, and perform specific functions. To ensure efficient functioning of such a network, proper infrastructure organization is required. The effectiveness of applying the Edge Computing concept within the Internet of Things (IoT) has been demonstrated. The Edge Computing concept involves processing data on devices that are closer to the data source, rather than on remote cloud servers. This reduces the load on the cloud and reduces data transmission delays. In the context of the Internet of Things, the Edge Computing concept can be used to process data obtained from IoT devices on the devices themselves or on nearby gateways, which can significantly improve the speed and efficiency of data processing. To provide more efficient computing performance and energy consuming become popular to using reconfigurable hardware together with edge computing. Reconfigurable computing involves using devices with flexible configuration to process data. In the context of IoT and Edge Computing, devices with flexible configuration can be used to process data collected from IoT devices, which allows adapting computing resources to a specific task and reduces data processing time. The application of Reconfigurable computing concept in IoT and Edge Computing can be particularly useful in cases where it is necessary to process large volumes of data with high accuracy and speed. As a result of the research, a basic scheme for IoT architecture and Edge computing system architecture was proposed, based on which the architecture of the FPGA system was formed. The architecture provides the flexibility and scalability necessary for the efficient processing of large volumes of data in real-time, while also minimizing the workload on the central processing unit.

Key words: *Internet of Things, edge computing, reconfigurable computing, field-programmable gate arrays, high-level synthesis, register-transfer level.*

Introduction. Over the last decade, the Internet of Things (IoT) has rapidly gained popularity and is now considered one of the most important technologies. It is used across a wide range of industries, from big players such as automotive and medicine, to house building and media industries [1-3]. It brings numerous benefits, including increased efficiency, automation, optimizing supply chains, reducing downtime, improve quality control and decision-making. Despite the security risks and privacy issues, IoT is driving digital transformation across industries and enabling the creation of new business models and revenue streams. Thereby, this technology is considered as a transformative technology with far-reaching implications. As such, it is crucial to understand both the potential benefits and the challenges associated with IoT and to work towards developing effective solutions.

IoT basically can be represented as a network of interconnected devices that can exchange data among themselves and with other networks without human intervention. It can include devices such as smartphones, home appliances, cars, medical

equipment, and many others. IoT network can be split into three different layers [3, 4]. The first one is IoT device itself, and this layer include device itself with different sensor, usually these are small devices with limited power consumption and performance. Second layer is Fog/Edge gateway — that is type of devices in IoT network which collect and process data from group of IoT devices. Third layer is Cloud node or server is main brain of the network and can process big amount of data. Usually all computing happens on cloud side and it create problem which is hard to resolve. One of the biggest problems is latency, IoT devices used in domain where such things as latency is very important and even can be dangers if it is big. Since device need to make decision in real time it is really important to reduce latency as much as it possible. With architecture where main decision maker is cloud, it is not possible since internet connection can be lost or server can be unavailable for different reason. Also, there is a bunch of another problem in Cloud computing conception such as: security, privacy, availability etc.

IoT devices collect and transmit massive amounts of data, and transferring this data to a centralized cloud

data processing center can be slow and resource-intensive in terms of network usage. Edge computing provides the ability to process data directly on IoT devices, which reduces delays in data transmission, reduces network congestion, and allows for faster responsiveness to changes in data. Conception of edge computing helps to resolve some issues created by Cloud computing. Instead of send data from devices to the server, Edge computing make data processing on edge gateway which is near to the device, or make this processing on the same devices. By using this manner of process data this conception brings a lot of advantages for IoT technologies and allow make decision about some action in place. Edge computing technology has proved to be a successful solution for addressing technical challenges in various practical applications. It has been particularly effective in dealing with the vast amounts of data generated by the geographically distributed network of IoT devices, which can cause significant data congestion issues [5, 6].

In the field of IoT and, in particular, Edge computing, Reconfigurable computing can be effectively utilized to enhance the performance and energy efficiency of edge devices. Reconfigurable computing enables the customization of hardware and software for specific applications, thereby optimizing the use of available resources and minimizing energy consumption. By adapting the hardware to the specific needs of the application, edge devices can achieve higher performance and lower latency, which is crucial for real-time processing and decision-making in IoT applications. Reconfigurable computing is a discipline which includes to itself hardware and software combination for creating a new conception for high-performance computing. Reconfigurable computing is also known as configurable computing or custom computing, since many of the design techniques can be seen as customizing a computational fabric for specific applications [7]. This type of computing allows to adapt hardware for specific algorithm which can improve algorithm performance in many times since algorithm running not on CPU which is universal and might not be the best fit for it but running on specific hardware architecture which is best for that specific algorithm. For example, GPU is the one of the best hardware architectures to make image processing or making parallel computing. This type of hardware architecture proves to be much better for that type of algorithm than CPU [8]. Except speed reconfigurable hardware has many other advantages compare to microprocessor. Reconfigurable hardware help to reduce energy and power consumption. In a

reconfigurable system, the circuitry is optimized for the application, such that the power consumption will tend to be much lower than that for a general-purpose processor. A recent study reports that moving critical software loops to reconfigurable hardware results in average energy savings of 35% to 70% with an average speed up of 3 to 7 times, depending on the particular device used [9].

It should be also noticed that since Edge computing algorithms require data processing near to the source of data, IoT devices itself require to be more powerful and more flexible in changing and adapting algorithm for data processing by using hardware organizing based on field-programmable gate arrays (FPGAs). Main advantages of FPGA are that it can be reprogrammable many times and it allows adapting hardware architecture for specific algorithm [10, 12]. Architecture based on FPGAs can be like a coprocessor and help main process make high performance computing on data since FPGA architecture can be adapted for this. Thus, within the scope of this study on adapting Edge computing in the organization of IoT infrastructure, methods such as Reconfigurable computing and hardware solutions based on FPGAs are proposed to be considered

Goal. The main objective of this article is to conduct a comprehensive analysis of four key technological concepts: IoT, edge computing, reconfigurable computing, and high-level synthesis. the article aims to provide a detailed description of each concept and illustrate their respective architectures to aid the reader's understanding additionally, the article intends to suggest potential avenues for future research by exploring the potential benefits of integrating reconfigurable hardware within edge computing architectures.

Architecture of internet of things. The architecture of IoT comprises five distinct layers that collectively define the entire spectrum of functionality within an IoT system. The fundamental depiction of the corresponding structure is illustrated in Fig. 1.

Let's consider the components of the IoT architecture according to the basic architecture organizing scheme presented above:

1) *Application layer.* This layer is responsible for conducting analysis and providing data to end user. Typically, this layer is comprised of a sophisticated software solution, employing a diverse range of technology stacks. For example the following classification of components of this layer can be presented:

– Mobile and desktop applications classified into types of native applications, hybrid applications and web applications.

- Intelligent services which provide personalized and efficient solutions to users automating complex tasks, analyzing Big Data, and making predictions based on trends.
- Device monitoring software which analyses activity of various electronic devices as a IoT nodes (parental control, employee monitoring, security monitoring).
- Device control software configuring settings such as device status, permissions, and access to sensitive data.
- Cloud services accessed over the internet and hosted on remote servers maintained by third-party providers basically classified into infrastructure services, platform services, and software services.
- Machine learning solution based on artificial neural network (ANN) algorithms and statistical functions.

- Connection-oriented protocol TCP/IP with high levels of reliability and basic connectionless protocol UDP/IP.
- Gateways as hardware or software modules of the IoT network performing translation between different protocols as well as encryption and decryption of IoT data.
- For physical connections, there are also extensive range of technologies commonly used in IoT, including further:
 - Ethernet as most basic wired computer networking technology.
 - Wireless networking technology Wi-Fi which uses radio protocol for data transmitting between devices in a local network.
 - NFC as wireless data transmission technology at close range that uses radio frequency identification (RFID) to secure information exchange between devices.

- Bluetooth as a wireless data transmission technology at short range that uses radio frequency for communication between mobile devices.
- LPWAN (Low-power Wide-area Network) as a wireless network technology designed for long-range communication with low power consumption.
- ZigBee which operates on low power and uses routing protocols to increase network coverage providing low power consumption and high reliability for data transmission between devices.
- Cellular networks widely used in IoT applications due to their wide coverage area, high reliability, and secure communication.

Furthermore it should be mentioned that to enable rapid and secure data exchange in IoT, the following message protocols are employed:

- MQTT (Message Queue Telemetry Transport) as a lightweight publish-subscribe messaging protocol that enables efficient communication between devices in IoT networks.
- LWM2M (Light way machine two machine) as a device management protocol for IoT that defines a set of standards and interfaces for managing and monitoring devices in a secure and efficient manner.
- CoAP (the Constrained Application Protocol) as a lightweight application layer protocol for to enable communication between devices with limited processing power and memory using uses UDP as the underlying transport protocol and supports RESTful interfaces for resource discovery and manipulation.
- AMQP (the Advanced Message Queuing Protocol) as an open standard messaging protocol enabling communication between applications and services in a distributed environment providing

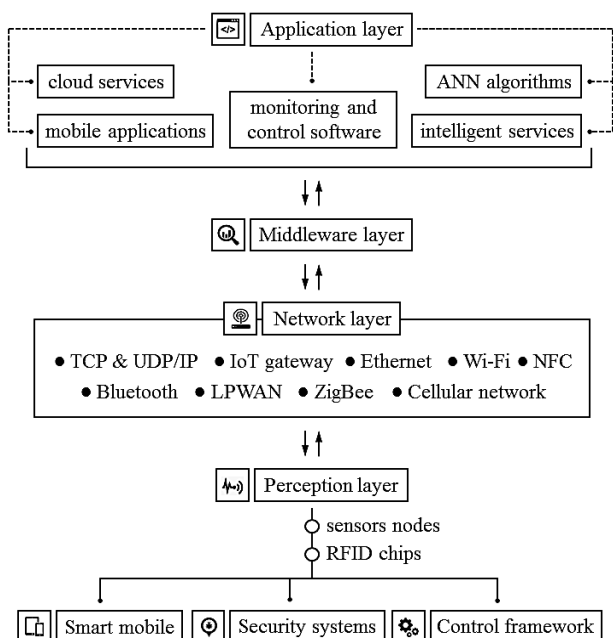


Fig. 1. Layers of IoT architecture

2) *Middleware layer*: The primary function of the layer is to receive and process data from the network layer, and based on the outcomes derived from ubiquitous computing, make informed decisions. This layer is also responsible for providing storage space for data and utilizing various algorithms to analyze it.

3) *Network layer*: The network layer, also known as the connectivity or transport layer, facilitates the transfer of data between the physical device and the middleware layer, as well as vice versa from the middleware layer to the device. The connectivity between the physical layer and the cloud is achieved in two ways:

a reliable and secure messages exchanging, with message queuing, routing, and flow control.

4) *Perception layer*. The perception layer is comprised of IoT network nodes based on sensors, RFID chips, etc. It includes mobile devices (smartphones, tablets, notebooks), security systems and control framework components (traffic network, industrial objects, healthcare). IoT nodes of these devices collect information in order to deliver it to the network layer.

In addition to the essential layers outlined above, the basic architecture of an IoT system can be augmented with several additional layers at the discretion of the system designer. These supplementary layers, which have gained popularity in recent years, include:

- The layer of edge or fog computing is responsible for processing data in close proximity to its source (IoT node). As part of the corresponding architecture, it could either be an edge gateway or the IoT device itself.

- The security layer is responsible for providing encryption and decryption of data, as well as managing the authentication and authorization flow.

- The business layer is where decisions are made based on data, enabling informed business choices. This layer facilitates the integration of the IoT system with the organizations existing business processes, allowing the system to provide insights that can inform business strategies and improve operational efficiency.

Edge computing architecture. Edge computing refers to a form of computing that occurs in close proximity to the device or even on the device itself. This approach is not limited to certain types of devices, but rather encompasses the use of any device capable of performing data processing. In essence, edge computing is a broad concept that extends beyond computing on specific devices.

Edge computing facilitates the integration of networking and computing, resulting in high-performance data computing and exchange architecture. The processing of data takes place in close proximity to the device, thereby minimizing the amount of data that needs to be transmitted to the central server. Moreover, most operations are carried out in real-time at the location where the data is generated, leading to the following benefits:

- improved response times;
- better bandwidth availability;
- more reliable system insights;
- comprehensive and expeditious analysis of data;
- high availability.

Edge computing is well-suited for scenarios that require the processing of time-sensitive data to facilitate prompt decision-making. Additionally, it outperforms cloud solutions for operations carried out in remote regions with limited or no internet connectivity. However, it is important to note that edge computing should not be viewed as a substitute for cloud computing. These technologies serve distinct purposes, and cannot be used interchangeably. Instead, edge computing should be seen as a complement to cloud computing, as the two technologies working in tandem can offer superior performance for specific use cases.

The typical architectural framework for edge computing [5, 6] comprises three distinct layers, as illustrated at a basic level in Figure 2:

- *Terminal layer*. The terminal layer constitutes a crucial aspect of the edge network, comprising a diverse array of devices, including mobile terminals, as well as a multitude of (IoT) devices, such as sensors, smartphones, smart cars, cameras, and numerous others. It is worth noting that this layer holds immense potential, as the number of devices capable of capturing and relaying data in this layer can reach into the billions. As such, the terminal layer plays a pivotal role in enabling the seamless functioning of the edge network, facilitating the collection and processing of data at the edge.

- *Edge layer*. The edge layer represents a crucial element in the architecture of edge computing, serving as a pivotal foundation for the operation of the overall network. This layer is composed of a diverse range of nodes that are distributed among edge devices, operating in close proximity to these devices to enable high-performance computations. These nodes undertake a variety of critical tasks, including data processing, storage, and transmission, among others, thereby facilitating the seamless functioning of the edge network.

- *Cloud layer*. Federated cloud-edge computing services have emerged as a promising paradigm for enabling efficient and scalable data processing in a distributed environment. Among the various layers of this architecture, the cloud layer serves as a dominant data processing center, offering a wide range of capabilities to handle complex computations. Comprising an extensive collection of high-performance servers and storage devices, the cloud layer holds immense potential to cater to the ever-increasing demand for data analysis, particularly in domains such as routine maintenance and business decision support.

To evaluate the effectiveness of a network based on IoT network edge computing architecture, it is

necessary to formalize the process of its operation by defining key components:

– *Edge device.* An edge device refers to a specialized device with restricted computing capacity that functions as the terminal layer in a standard three-layer architecture. In an Edge Computing Architecture, edge devices play a crucial role in gathering and processing data at the network’s edge, thereby reducing latency and bandwidth usage.

– *Edge Gateway.* The Edge Gateway is a server whose primary function is to perform network routing, tunneling, firewall management, and other related tasks. Additionally, this device can facilitate certain data processing as necessary. It is a fundamental component of the Edge layer in a typical three-layer architecture.

– *Edge server.* An Edge server is a type of server that executes data processing tasks originating from edge devices. Typically, such servers are situated in close proximity to the edge devices that generate the data. This constituent is an essential element of the Edge layer in a typical three-layer architecture.

– *Cloud server.* A Cloud server is the primary server that may be located remotely from the edge devices. This category of server can execute computational tasks that are not time-critical in nature. There may be multiple servers employed in

this regard. This component is an integral aspect of the Cloud layer in a conventional three-layer architecture.

FPGA Design. Reconfigurable computing systems are a class of computing systems that utilize FPGAs to enhance the execution speed of computationally-intensive algorithms by mapping them onto the reconfigurable substrate. FPGAs are particularly well-suited for such tasks as they can be reprogrammed multiple times to suit the requirements of a particular computation and thereby offer significant flexibility. These reconfigurable hardware resources are often coupled with a general-purpose microprocessor that is responsible for controlling the reconfigurable logic and executing program code that cannot be efficiently accelerated. This combination of a reconfigurable hardware substrate and a general-purpose processor is commonly referred to as hybrid architecture. The microprocessor operates as a host controller that communicates with the reconfigurable logic and directs it to execute the accelerated computations. This type of system is particularly beneficial for IoT applications where high performance is crucial, but the computations required are too complex or too diverse to be efficiently executed on traditional general-purpose processors [13-16]. FPGAs are integrated circuits that comprise an array of programmable logic

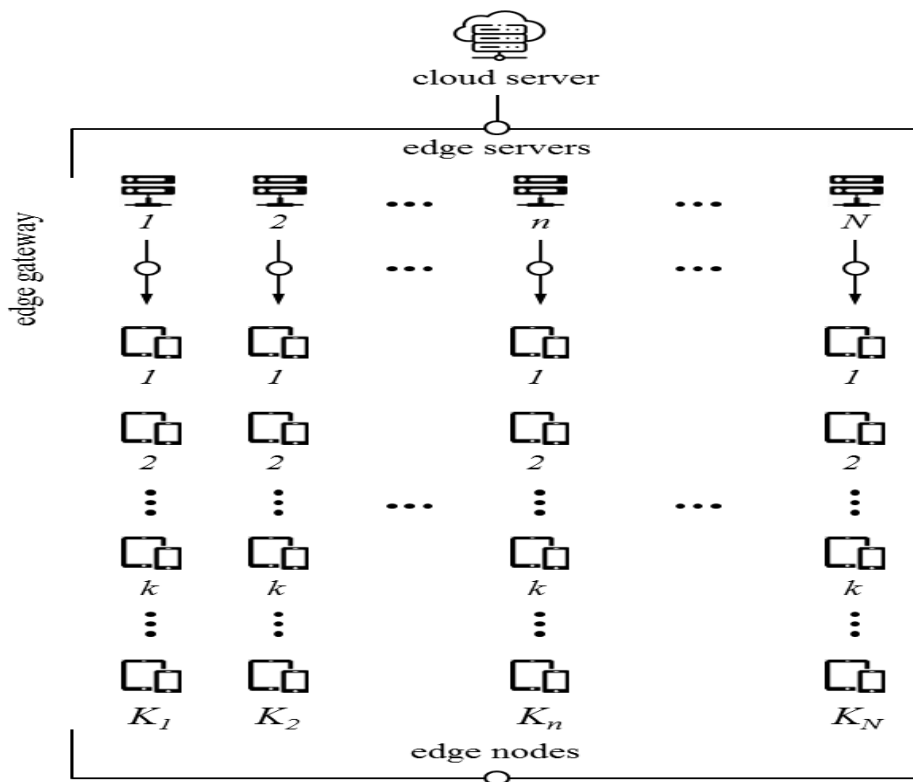


Fig. 2. Edge computing system architecture with key components

blocks, which are interconnected by a hierarchy of reconfigurable interconnects. These logic blocks can be configured to perform complex combinational functions or serve as simple logic gates, such as AND/XOR gates. Moreover, most FPGAs also incorporate memory elements, which can take the form of simple flip-flops or more advanced blocks of memory. These memory elements enhance the versatility of the FPGAs [15-17].

Figure 3 displays the internal architecture of a standard FPGA system, which is composed of three primary components:

- Configurable Logic Blocks (CLB) which implement logic functions.
- Programmable Interconnects (PI) which implement routing.
- Programmable I/O Blocks (PIOB) which connect with external components.

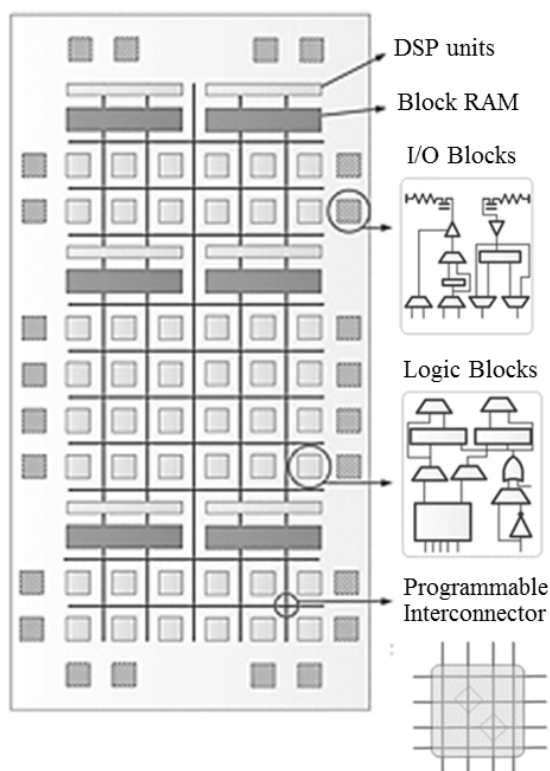


Fig. 3. Architecture of FPGA system

The logical functions are comprised of multiple components, and are essential for the design implemented by the logic block. To interface the configurable logic blocks and routing architecture with external components, input/output blocks are utilized.

High-level synthesis for FPGA. High-level synthesis (HLS) is a design process that transforms a high-level, functional description of a design into a

Register Transfer Level (RTL) implementation, which satisfies user-specified design constraints. HLS is also known as behavioral synthesis and algorithmic synthesis. The HLS design description is considered "high-level" in two ways: design abstraction and specification language [18]. Design abstraction refers to the degree of detail at which the design is described. In HLS, the design is described at a higher level of abstraction than RTL. At the high-level of abstraction, the design is described in terms of its functionality and behavior, whereas, at the RTL level, it is described in terms of low-level hardware components such as registers, flip-flops, and gates. Specification language refers to the language used to describe the design. In HLS, the design is described using high-level languages which prove to be closer to natural language and are easier to understand for designers who do not have a background in digital design.

Compared to RTL, the HLS design description exhibits two aspects of being "high level": design abstraction and specification language.

- High level of abstraction. The high level of abstraction in HLS can be attributed to the fact that its input consists of an untimed, or partially timed, dataflow or computation specification of the design. This level of abstraction surpasses that of RTL, as it does not delineate a definitive cycle-by-cycle behavior, thereby providing HLS tools with the autonomy to make decisions regarding each clock cycle.

- The specification language employed in HLS is deemed high level, as its input is articulated using languages such as C, C++, System C, or even Matlab. This feature enables the utilization of advanced language attributes such as loops, arrays, classes, pointers, inheritance, overloading, templates, polymorphism, and other similar features. This level of specification surpasses that of the synthesizable subset of RTL description languages, as it permits design descriptions that are concise, reusable, and readable.

Quartus Prime software. The Quartus Prime software from Intel Corporation is a powerful tool for designing digital devices based on programmable logic devices (PLDs) and systems-on-chip (SoCs). Its versatile applications include distributed computing performed on edge devices that are in close proximity to the data source. With Quartus Prime, it is possible to create high-performance and energy-efficient PLDs and SoCs that can process data on-site with minimal latency and high speed. This capability empowers developers to design devices that not only perform data processing, but also manage it. Consequently, Quartus Prime facilitates the creation of edge devices that can not only process data, but

also make decisions on-site, without the need to send data to a central server. The software’s ability to create software for SoCs opens up new possibilities for developing smarter devices that can perform advanced data processing tasks [19].

This subsection delineates the implementation of Quartus Prime software using the suggested approach on the FPGA. It is supposed that Verilog HDL as high-level hardware description language could be used to design and simulate digital circuits and systems to script the modules, while Quartus Prime software was used to perform synthesis, converting the Verilog register-transfer level design to bit streams, which could then be programmed onto the FPGA. FPGA devices are equipped with specialized on-chip memory blocks known as block random access memories (BRAMs) which come in different sizes depending on the particular FPGA in use. BRAMs could be leveraged as the internal memory resource for storing the external memory addresses.

The standard BRAM capacity ranges up to 32 Kbits, with 32 bits of memory width and 1 Kbits of depth. Thereby for edge computing reconfigurable devices systems application, a single BRAM is adequate without the need for concatenation.

For the sake of simplicity in explanation, we have omitted the input manager module and external memory connections from our discussion. Once the input is received, the sequence number extracted from it is directed to the pipeline controller for sorting. The counter, which serves as an internal register within the controller, is responsible for keeping track of the current in-order value. The controller compares this counter with the incoming sequence and the first register of the pipeline.

To facilitate these functions, the controller is implemented using a finite state machine, which generates the appropriate command signals to direct the pipeline or the output manager. By means of this design, the pipeline can effectively sort the incoming sequence and relay the sorted data to the output manager for further processing or output. In order to facilitate shifting, the shift registers within the pipeline are interconnected with their left and right neighbors. This method of shifting all data bits at once in a single clock cycle is a commonly used technique in digital circuit design.

Comparator blocks could be utilized within the pipeline as indicators. The output manager incorporates a multiplexer to choose between the sequence released from the pipeline or a by-passed value directly from the input manager, depending on the current operation. The output selected by the multiplexer is then directed to the FIFO queue. At this level, only the BRAM address from the pipeline’s reference pointer is of significance. The queue identifies the corresponding BRAM memory location, matches it with the external memory address, and retrieves the entire packet.

SLX Silexica. The SLX Software Tool, developed by Silexica and currently integrated within Xilinx Company, serves as an additional platform for the creation of highly optimized FPGA-based architectures for computing purposes. The SLX FPGA platform functions as an overlay above the High-Level Synthesis (HLS) compiler, providing a suite of tools for optimizing code written in the high-level programming languages (C or C++). The structure of the SLX tool is depicted in Fig. 5.

Formalization of the SLX Software Tool work process allows building a model that includes the following components:

- Synthesizability Refactoring. At the Synthesizability Refactoring stage, the tool analyzes

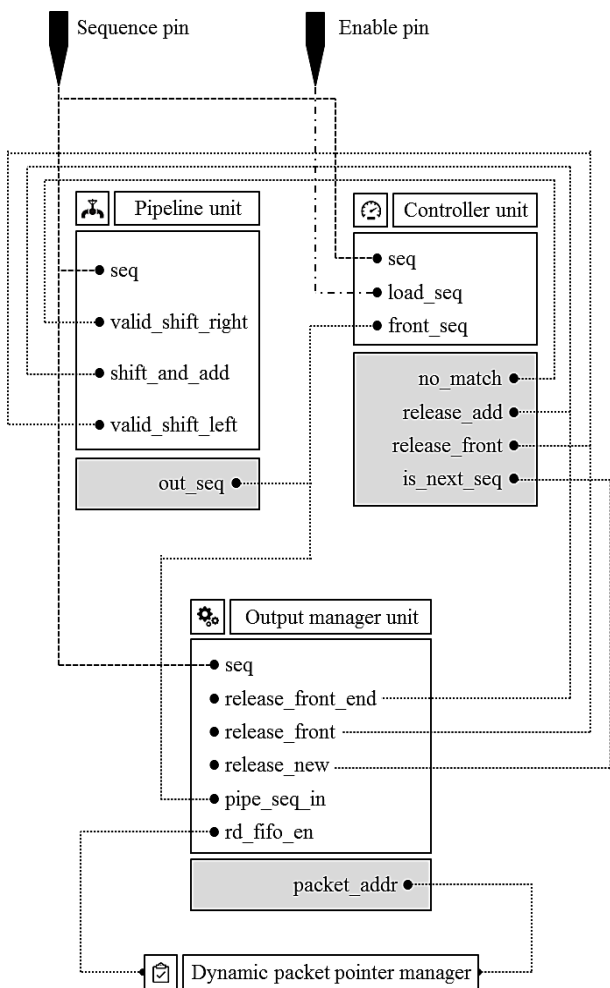


Fig. 4. Verilog HDL module architecture for FPGA prototyping with Quartus Prime

C++ code and performs refactoring to adhere to SLX's own code standard.

- Parallelism Detection. At the Parallelism Detection stage, SLX analyzes code to identify the potential for parallelizing certain parts of the code. This stage determines the number of parts that can be parallelized and optimizes them for FPGA.

- Hardware Optimization. The Hardware Optimization layer is responsible for optimizing algorithms for specific hardware. Based on the characteristics of different hardware, SLX can optimize FPGA characteristics such as clock frequency, among others.

- Pragma Insertion. At the Pragma Insertion stage, SLX prepares sets of pragmas for the source code based on the previous stage. These pragma sets are instructions for the HSL compiler and can vary depending on the specific hardware platform.

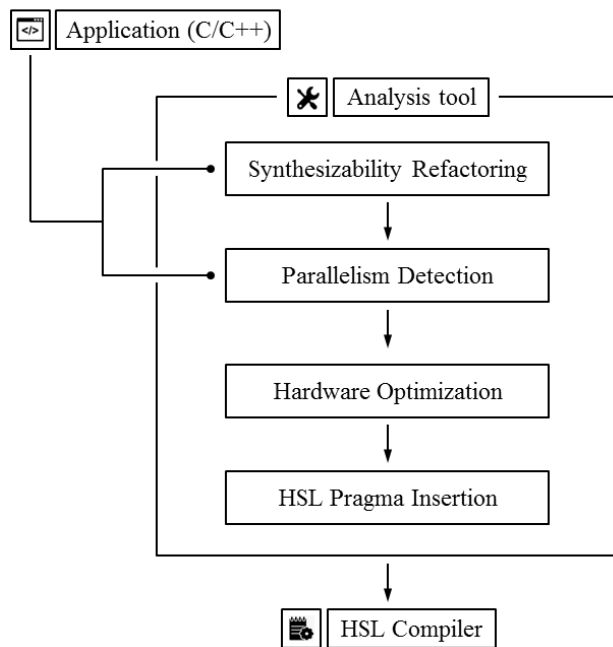


Fig. 5. Structure of SLX platform

Chameleon C2HDL. The Chameleon C2HDL design tool has been developed by the ASP to facilitate the automatic generation of HDL models from algorithms described in the ANSI C language [20]. By specifying an algorithm for data processing in ANSI C, a developer can obtain a thoroughly debugged and synthesizable VHDL RTL model of the device that implements the algorithm. In addition to the algorithm of the data processing, input information required by the Chameleon© C2HDL design tool

includes the ASP's interface specification and technical characteristics, such as desired performance boundaries [21]. The platform for the ASP synthesis is configurable processor architecture configured according to the following input parameters:

- desired performance (the number of parallel Functional Units);
- the width of data structure;
- the minimal percentage of commands that should load each parallel Functional Unit;
- the communication network structure.

Figure 6 depicts the fundamental operational framework of the chameleon C2HDL design tool.

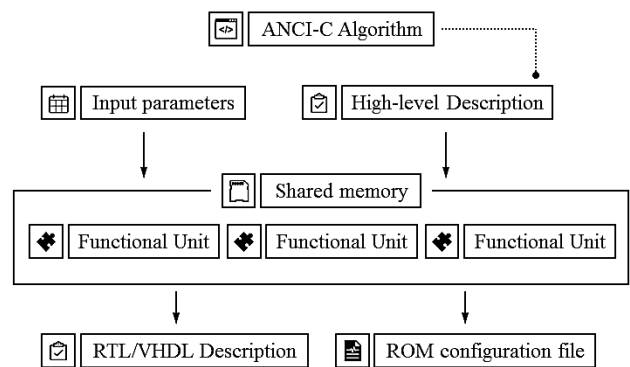


Fig. 6. Basic Scheme of Chameleon C2HDL Design Tool Operation

Future research. The primary research focus moving forward will center on the concept of combining edge computing architecture for IoT devices with reconfigurable hardware. The incorporation of reconfigurable hardware promises to enhance the flexibility of IoT devices and enable them to process data locally. The potential advantages of this approach include the ability to adapt data processing algorithms to specific environmental conditions and varying data loads, which in turn will result in IoT devices that are more energy-efficient and operate with maximal performance.

Conclusion. This article has examined several key concepts, including the Internet of Things (IoT), edge computing, and reconfigurable hardware. The analysis included an assessment of the contemporary toolset available for synthesizing hardware solutions utilizing Field Programmable Gate Array technology. Furthermore, this study introduced a novel avenue of research focused on the integration of reconfigurable processors for both edge computing and IoT devices.

Bibliography:

1. Sabourin V., Jabo J. T. IOT and the future of the Telecom Industry. *IoT Benefits and Growth Opportunities for the Telecom Industry*. Boca Raton, Florida : CRC Press, 2022. P. 57–59. DOI: 10.1201/9781003294412-6.

2. Mattihalli C., Gared F., Getnet L. Automatic plant leaf disease detection and auto-medicine using IOT Technology. *IoT-Based Intelligent Modelling for Environmental and Ecological Engineering* / eds.: P. Krause, F. Xhafa. Cham : Springer, 2021. P. 257–273. DOI: 10.1007/978-3-030-71172-6_11.
3. Kutseva M. Adaptation of seven-layered IOT architecture for energy efficiency management in Smart House. *2022 10th International Scientific Conference on Computer Science (COMSCI)*, 30 May 2022 - 02 June 2022. Bulgaria, Sofia : IEEE, 2022. DOI: 10.1109/comsci55378.2022.9912604.
4. Karpan A. *The Internet of Things*. New York : Greenhaven Publishing, 2022.
5. Minu R. I., Nagarajan G. Bridging the IOT gap through Edge Computing. *Edge Computing and Computational Intelligence Paradigms for the IoT*. Hershey, PA : IGI Global, 2019. P. 1–9. DOI: 10.4018/978-1-5225-8555-8.ch001.
6. Glance D. G., Cardell-Oliver R. Privacy of edge computing and IOT. *Secure Edge Computing* / eds.: M. Ahmed, P. Haskell-Dowland. Boca Raton, Florida : CRC Press, 2021. P. 83–98. DOI: 10.1201/9781003028635-7.
7. Kavitha V., Malathi V. A smart solar PV monitoring system using IOT. *First International Conference on Secure Reconfigurable Architectures & Intelligent Computing (SRAIC 2019)*, November 28-30, 2019. Tiruchirappalli : National Institute of Technology, 2019. P. 19-33. DOI: 10.5121/csit.2019.91502.
8. Sano Y., Kobayashi R., Fujita N., Boku T. Performance evaluation on GPU-FPGA accelerated computing considering interconnections between accelerators. *HEART '22 : Proceedings of the 12th International Symposium on Highly-Efficient Accelerators and Reconfigurable Technologies*, 09-10 June 2022. New York : Association for Computing Machinery, 2022. P. 10-16. DOI: 10.1145/3535044.3535046.
9. Automatic energy-minimized HW/SW partitioning for FPGA-accelerated MPSoCs / Fuhr G. et al. *IEEE Embedded Systems Letters*. 2019. Vol. 11, No. 3. P. 93–96. DOI: 10.1109/les.2019.2901224.
10. Kim J.-H. FPGA design of an NB-IOT downlink transmitter using a Simulink model. *The Journal of Korean Institute of Communications and Information Sciences*. 2022. Vol. 47, No. 12. P. 2179–2191. DOI: 10.7840/kics.2022.47.12.2179.
11. Hong S., Park Y. A FPGA-based neural accelerator for small IOT devices. *2017 International SoC Design Conference (ISOC)*, 05-08 November 2017. Korea (South), Seoul : IEEE, 2017. DOI: 10.1109/isoc.2017.8368903.
12. Kelati A., Gaber H. IOT for Home Energy Management (HEM) using FPGA. *2021 IEEE 9th International Conference on Smart Energy Grid Engineering (SEGE)*, 11-13 August 2021. Canada, ON, Oshawa : IEEE, 2021. DOI: 10.1109/sege52446.2021.9534986.
13. Harsha V. Implementation of low cost IOT based home automation system on SPARTAN FPGA. *International Journal of Recent Trends in Engineering and Research*. 2018. P. 513–516. DOI: 10.23883/ijrter.conf.20171225.078.eq2op.
14. Kim J.-H. FPGA design of an NB-IOT downlink transmitter using a Simulink model. *The Journal of Korean Institute of Communications and Information Sciences*. 2022. Vol. 47, No. 12, P. 2179–2191. DOI: 10.7840/kics.2022.47.12.2179.
15. Magyari A., Chen Y. *FPGA remote laboratory using IOT approaches*. *Electronics*. 2021. Vol. 10, No. 18. P. 2229. DOI: 10.3390/electronics10182229.
16. Daisy A. Neuroscience in FPGA and application in IOT. *Advances in Systems Analysis, Software Engineering, and High Performance Computing* / eds.: P. Sharma, & R. Nair. Hershey, PA : IGI Global, 2020. P. 97–107. DOI: 10.4018/978-1-5225-9806-0.ch005.
17. Kelati A., Gaber H. IOT for Home Energy Management (HEM) using FPGA. *2021 IEEE 9th International Conference on Smart Energy Grid Engineering (SEGE)*, 11-13 August 2021. Canada, ON, Oshawa : IEEE, 2021. DOI: 10.1109/sege52446.2021.9534986.
18. Oshana R. Overview of embedded systems development lifecycle using DSP. *DSP for Embedded and Real-Time Systems*. London : Newnes, 2012. P. 29–61. DOI: 10.1016/b978-0-12-386535-9.00003-2.
19. Hoang V. Q., Chen Y. Cost-effective network reordering using FPGA. *Sensors*. 2023. Vol. 23, No. 2, P. 819. DOI: 10.3390/s23020819.
20. Melnyk A., Melnyk V. Self-improvable computer system model and architecture based on reconfigurable hardware, automatic design and synthesis tools and artificial intelligence technologies. *Proceedings of the Fourth International Workshop on Computer Modeling and Intelligent Systems (CMIS-2021)*, April 27, 2021. Zaporizhzhia, 2021. P. 356-367.
21. Melnyk A., Melnyk V. Specialized Processors Automatic Design Tools-the Basis of Self-Configurable Computer and Cyber-Physical Systems. *2019 IEEE International Conference on Advanced Trends in Information Theory (ATIT)*, 18-20 December 2019. Kyiv : IEEE, 2019. P. 326-335. DOI: 10.1109/ATIT49449.2019.9030481.

**Майдан М.В. СИНТЕЗ ПРОЦЕСОРІВ ІОТ ПРИСТРОЇВ В ПЕРЕДЖЕВИХ ОБЧИСЛЕННЯХ:
АНАЛІЗ ПІДХОДІВ**

Досліджено сучасні підходи до організації інфраструктури мережі Інтернет речей (IoT). IoT – це глобальна мережа фізичних пристроїв, які можуть взаємодіяти один з одним і хмарою, обмінюватися даними та виконувати певні функції. Для ефективного функціонування такої мережі необхідна належна організація інфраструктури. Продемонстровано ефективність застосування концепції *Edge Computing* в Інтернеті речей (IoT). Концепція *Edge Computing* передбачає обробку даних на пристроях, розташованих ближче до джерела даних, а не на віддалених хмарних серверах. Це знижує навантаження на хмару та зменшує затримки передачі даних. У контексті Інтернету речей концепцію *Edge Computing* можна використовувати для обробки даних, отриманих від пристроїв IoT, на самих пристроях або на найближчих шлюзах, що може значно підвищити швидкість і ефективність обробки даних. Для забезпечення більш ефективної обчислювальної продуктивності та енергоспоживання стає популярним використання реконфігурованого апаратного забезпечення разом із периферійними обчисленнями. Реконфігурація обчислень передбачає використання пристроїв із гнучкою конфігурацією для обробки даних. У контексті IoT та *Edge Computing* пристрої з гнучкою конфігурацією можуть використовуватися для обробки даних, зібраних з пристроїв IoT, що дозволяє адаптувати обчислювальні ресурси до конкретного завдання та скорочує час обробки даних. Застосування концепції *Reconfigurable computing* в IoT і *Edge Computing* може бути особливо корисним у випадках, коли необхідно обробляти великі обсяги даних з високою точністю та швидкістю. В результаті дослідження запропоновано базову схему архітектури IoT та архітектури *Edge computing* системи, на основі якої сформовано архітектуру системи FPGA. Архітектура забезпечує гнучкість і масштабованість, необхідні для ефективної обробки великих обсягів даних у режимі реального часу, а також мінімізує навантаження на центральний процесор.

Ключові слова: Інтернет речей, периферійні обчислення, реконфігуровані обчислення, програмовані вентильні матриці, високорівневий синтез, рівень регістрової передачі.

Олещенко Л.М.

Національний технічний університет України

«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

ОСОБЛИВОСТІ ПРОГРАМНОЇ РЕАЛІЗАЦІЇ ТЕХНОЛОГІЇ SPARK ТА МОВИ ПРОГРАМУВАННЯ R ДЛЯ РОЗПОДІЛЕНИХ ОБЧИСЛЕНЬ ВЕЛИКИХ ДАНИХ

У статті розглядаються особливості програмної реалізації технології Spark та мови програмування R для розподілених обчислень для набору даних з пакету `usflights13` середовища R, який містить дані з описом 336776 авіарейсів. Розглянуто такі особливості технології Spark, як швидкодія, підтримка інструментів для аналітики та масштабованість, наведено порівняння застосування технологій Hadoop та Spark для виконання ітеративних алгоритмів PageRank, K-Means та LR. Розподілені обчислення дозволяють ефективно обробляти та аналізувати великі обсяги даних, які перевищують можливості одного сервера. Розподілені системи забезпечують горизонтальне масштабування та працюють з великими обсягами даних, використовуючи кластери з кількома вузлами. Завдяки розподіленім обчисленням різні компанії та організації можуть використовувати потужність паралельної обробки даних та приймати рішення на основі оброблених даних вчасно. Розподілена природа таких систем забезпечує стійкість до відмов та резервування, забезпечуючи неперервність обробки даних у разі відмов апаратного або програмного забезпечення. В цілому, розподілені обчислення є необхідними для вирішення проблем, що виникають при роботі з великими обсягами даних, та дозволяють організаціям використовувати їх потенціал. Технологія Apache Spark є однією з найпопулярніших платформ для розподілених обчислень великих даних. Spark використовує пам'ять для проміжних обчислень, що значно прискорює виконання операцій з даними порівняно з іншими системами розподілених обчислень. Також Spark підтримує різні мови програмування, включаючи Java, Scala, Python та R, надає високорівневі API для роботи з даними, такі як розподілена колекція даних RDD та DataFrame. Технологія Spark включає модулі для машинного навчання Spark MLlib, обробки потокових даних Spark Streaming та графових обчислень GraphX, що дозволяє виконувати різноманітні завдання аналітики на одній платформі. У статті наведено приклади роботи Spark з кластерами різного розміру з автоматичним розподіленням обчислень, зберіганням даних, що дозволяє масштабувати обробку великих обсягів даних та забезпечувати стійкість до відмов та відновлення даних у випадку неполадок апаратного забезпечення або програмних помилок.

Ключові слова: програмні засоби, великі дані, оброблення даних, аналіз, Spark, розподілені обчислення, DataFrame, мова програмування R, HiveQL.

Постановка проблеми. Розподілені обчислення великих даних мають велике значення у сучасному світі з огляду на нашу здатність зберігати та генерувати все більші обсяги даних. Розподілені системи дозволяють ефективно обробляти та аналізувати великі обсяги даних, які перевищують межі єдиного сервера. Завдяки розподіленим обчисленням можна використовувати кластери з багатьма вузлами, що забезпечує горизонтальне масштабування і можливість працювати з великими обсягами даних. Розподілені обчислення дозволяють паралельно обробляти дані на багатьох вузлах кластера, що дозволяє збільшити швидкість обробки. Завдяки використанню оперативної пам'яті для зберігання даних (як у випадку з Spark), можна досягти ще більшої швидкодії.

Також розподілені системи дозволяють проводити аналітику та обробку даних в реальному часі, швидко аналізувати великі обсяги даних з метою виявлення складних залежностей та патернів. Це особливо важливо для сфер, де швидкість реакції має велике значення, наприклад, у фінансовому секторі, маркетингу, телекомунікаціях та інших галузях. Це допомагає виявляти цінну інформацію та робити прогнози для економії та розподілу ресурсів.

Метою статті є дослідження особливостей практичного застосування технології Spark та мови програмування R для розподілених обчислень великих даних.

Виклад основного матеріалу

Аналіз існуючих програмних рішень для розподілених обчислень великих даних

На сьогодні найбільш поширеними програмними рішеннями для розподілених обчислень

великих даних є Apache Hadoop, Apache Spark, Apache Flink та Apache Cassandra.

Apache Hadoop є одним з найпопулярніших фреймворків для обробки великих обсягів даних, що базується на моделі розподіленого обчислення MapReduce та системі файлів Hadoop Distributed File System (HDFS). Кластер HDFS складається з одного NameNode, головного сервера, який керує простором імен файлової системи та регулює доступ до файлів клієнтами. Крім того, існує кілька DataNodes, зазвичай по одному на вузол у кластері, які керують сховищем, підключеним до вузлів, на яких вони працюють.

HDFS відкриває простір імен файлової системи та дозволяє зберігати дані користувача у файлах. Внутрішньо файл розбивається на один або кілька блоків, і ці блоки зберігаються в наборі DataNodes.

NameNode виконує такі операції простору імен файлової системи, як відкриття, закриття та перейменування файлів і каталогів. NameNode також визначає відображення блоків у DataNodes. DataNodes відповідають за обслуговування запитів на читання та запис від клієнтів файлової системи (рис. 1). Hadoop надає масштабовану та надійну платформу для обробки великих даних на кластері серверів [1].

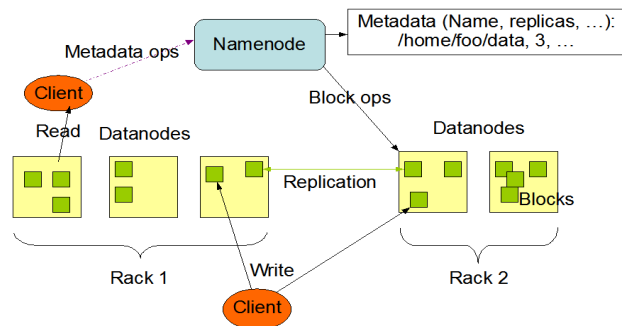


Рис. 1. Архітектура HDFS [2]

Apache Spark є відкритим фреймворком, який пропонує широкі можливості для розподіленого обчислення великих даних, включаючи обробку в пам'яті, підтримку багатьох мов програмування (Java, Scala, Python, R) та різні бібліотеки для аналізу даних, машинного навчання та графових обчислень (рис. 2). Зокрема, структура Spark включає Spark Core як основу для платформи, Spark SQL для інтерактивних запитів, Spark Streaming для аналітики в реальному часі, Spark MLlib для машинного навчання та Spark GraphX для обробки графів [3].

Однією з особливостей технології Spark для розподілених обчислень є її здатність до обробки даних in-memory. Spark зберігає дані в оперативній пам'яті (RAM) на кластері вузлів, що дозволяє значно прискорити обробку даних порівняно з традиційними системами, які зберігають дані на диску. Ця особливість Spark досягається завдяки своїй архітектурі Resilient Distributed Dataset (RDD). RDD є фундаментальним концептом Spark і представляє собою незмінний розподілений набір елементів даних, який може бути обчислений паралельно. RDD автоматично розподіляє дані між вузлами кластера і зберігає їх в оперативній пам'яті. Це дозволяє уникнути частих звернень до диску для доступу до даних і забезпечує швидку обробку даних. Ще однією особливістю Spark є можливість виконувати різні типи обчислень на одних і тих самих даних без необхідності зберігати дані в окремих системах. Spark надає багато вбудованих бібліотек для обробки даних, машинного навчання, графових обчислень тощо. Це дозволяє використовувати Spark для завдань обробки даних без необхідності переключатися між різними системами. Spark надає високу продуктивність і масштабованість для розподілених обчислень і обробки великих обсягів даних.

Apache Flink є фреймворком для потокової та пакетної обробки даних, надає потужні засоби для

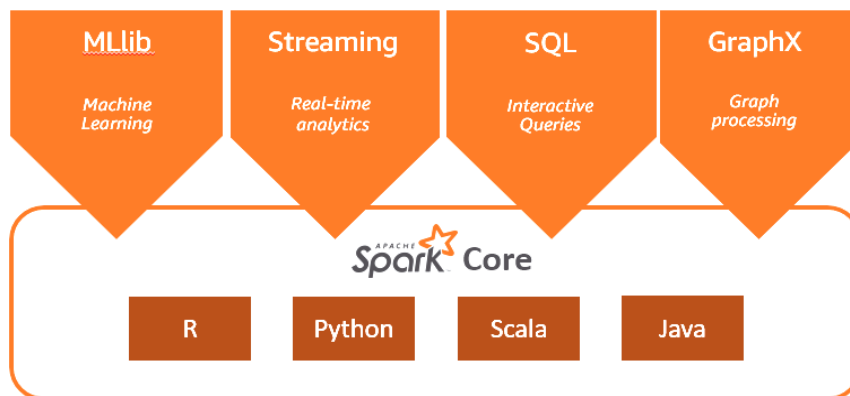


Рис. 2. Робочі навантаження Apache Spark [3]

розподіленого обчислення та аналізу великих обсягів даних в реальному часі (рис. 3). Flink підтримує потокову обробку даних (stream processing), комплексні аналітичні запити (complex event processing) та інші сценарії обробки даних [4].

Будь-які дані створюються як потік подій. Транзакції кредитних карток, вимірювання датчиків IoT, машинні журнали або взаємодії користувачів на вебсайті чи в мобільному додатку – усі ці дані генеруються як потік. Керування часом і станом дозволяє Flink запускати будь-які програми в необмежених потоках. Обмежені потоки внутрішньо обробляються за допомогою алгоритмів і структур даних, які спеціально розроблені для

наборів даних фіксованого розміру, що забезпечує високу продуктивність (рис. 4).

Apache Cassandra є розподіленою системою управління базами даних (distributed database management system), яка спеціалізується на обробці великих обсягів даних та доступності. Cassandra дозволяє розподіляти дані на кластері серверів та забезпечує високу швидкість та масштабованість для зберігання та операцій з даними [5].

Apache Hive – це розподілена відмовостійка система сховища даних, яка забезпечує аналітику у великому масштабі [6]. Hive Metastore (HMS) надає центральне сховище метаданих, які можна

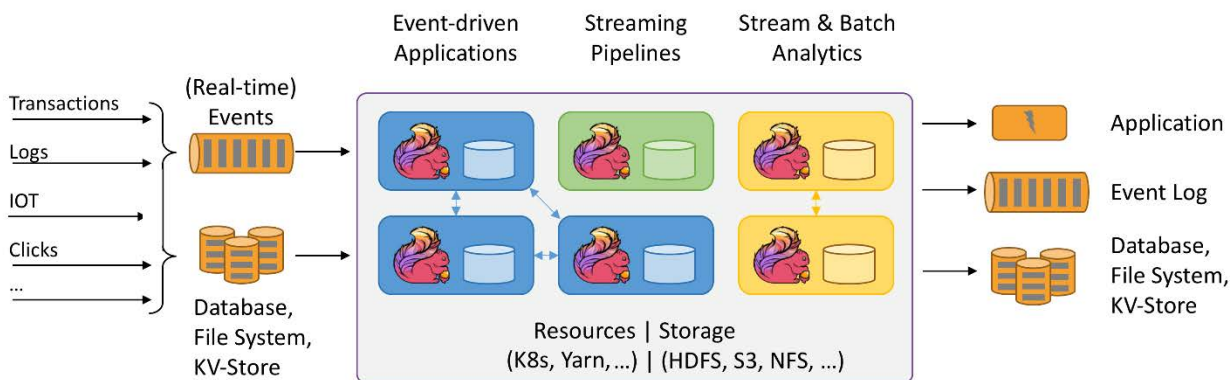


Рис. 3. Можливості Apache Flink [4]

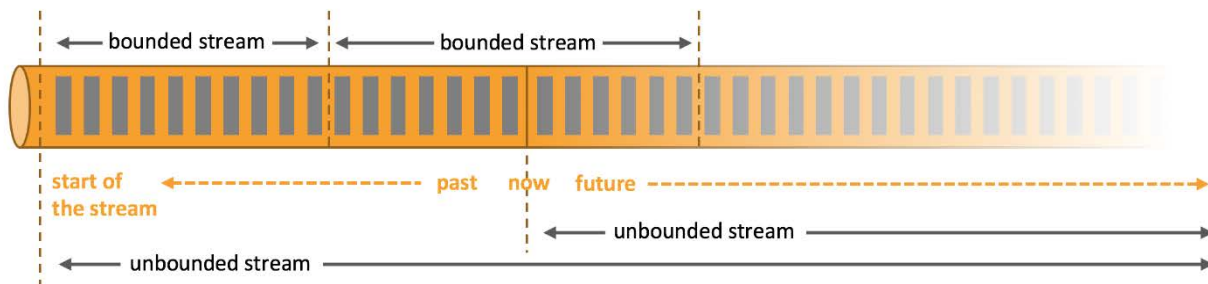


Рис. 4. Дані як необмежені або обмежені потоки [4]

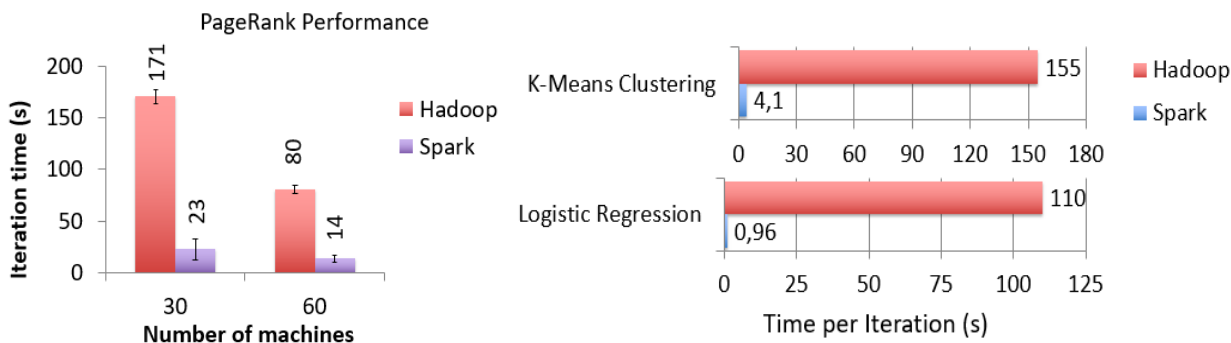


Рис. 5. Порівняння застосування технологій Hadoop та Spark для виконання ітеративних алгоритмів PageRank, K-Means та LR [8]

проаналізувати для прийняття обґрунтованих рішень, керованих даними, і тому це критичний компонент багатьох архітектур централізованих сховищ даних Data Lake. Hive створено на основі Apache Hadoop і дозволяє користувачам читати, записувати та керувати петабайтами даних за допомогою SQL (HiveQL) [7].

У попередніх дослідженнях було проведено порівняння часу обробки даних для виконання ітеративних алгоритмів за допомогою технологій Hadoop та Spark (рис. 5). Згідно різних досліджень, Spark працює загалом приблизно в 100 разів швидше, ніж Hadoop [8-10].

Програмна реалізація розподілених обчислень великих даних

Програмна платформа Spark написана на Scala та Java і вимагає Java Virtual Machine (JVM), тому перед інсталяцією Spark потрібно переконатися, що на комп'ютері встановлено мову Java версії, не нижче 1.8, з середовища R це можна перевірити за допомогою виклику відповідної команди:

```
> system("java -version")
java version "1.8.0_351"
Java(TM) SE Runtime Environment (build 1.8.0_351-b10)
Java HotSpot(TM) 64-Bit Server VM (build 25.351-b10, mixed mode)
[1] 0
```

Команда повернула нульовий код завершення програми, а отже, Java встановлена в системі. Як бачимо, Java має версію 1.8, що цілком відповідає вимогам платформи Spark. Після цього потрібно встановити пакет *sparklyr* для того, щоб працювати з кластером Spark, використовуючи середовище R. Підключимо даний пакет до поточного середовища. Встановимо версію Spark 3.2 за допомогою команди *spark_install()* з пакету *sparklyr*. За допомогою команди *spark_installed_versions()* перевіримо, яку версію Spark і Hadoop в результаті було встановлено на комп'ютері:

```
> install.packages("sparklyr")
package 'sparklyr' successfully unpacked and MD5 sums checked
> require(sparklyr)
Loading required package: sparklyr
Attaching package: 'sparklyr'
> spark_install("3.2")
Installing Spark 3.2.3 for Hadoop 3.2 or later.
Installation complete.
> spark_installed_versions()
```

Як можна побачити вище, пакет *sparklyr* було успішно завантажено, а платформа Spark версії 3.2.3 успішно інстальована, разом з платформою Hadoop версії 3.2. Підключимось до локального Spark-кластеру. Для цього використаємо функцію *spark_connect()* з пакету *sparklyr*:

```
> sc <- spark_connect(master = "local", version = "3.2")
```

Об'єкт, що повертається цією функцією, містить різного роду службову інформацію про

кластер. У даному дослідженні було використано набір даних з пакету *nyctflights13* середовища R, який містить таблиці з описом 336776 авіарейсів (рис. 6).

```
> glimpse(flights)
#> # A tibble: 336,776 x
#>   year   month   day dep_time sched_dep_time   dep_delay arr_time   arr_delay carrier flight   tailnum origin dest distance air_time  time_hour
#>   <dbl> <dbl> <dbl> <chr>         <chr>           <dbl> <chr>         <dbl> <chr> <chr> <chr> <chr> <chr> <dbl> <dbl> <chr>
#> 1 2013     1     1 15:01:00 15:00:00         0  B6 1111 1111 1111 1111 1111 1111 1111 1111 1111 1111 1111 1111 1111 1111 1111 1111
#> 2 2013     1     1 15:01:00 15:00:00         0  B6 1111 1111 1111 1111 1111 1111 1111 1111 1111 1111 1111 1111 1111 1111 1111 1111 1111
#> 3 2013     1     1 15:01:00 15:00:00         0  B6 1111 1111 1111 1111 1111 1111 1111 1111 1111 1111 1111 1111 1111 1111 1111 1111 1111
#> 4 2013     1     1 15:01:00 15:00:00         0  B6 1111 1111 1111 1111 1111 1111 1111 1111 1111 1111 1111 1111 1111 1111 1111 1111 1111 1111
#> 5 2013     1     1 15:01:00 15:00:00         0  B6 1111 1111 1111 1111 1111 1111 1111 1111 1111 1111 1111 1111 1111 1111 1111 1111 1111 1111
#> 6 2013     1     1 15:01:00 15:00:00         0  B6 1111 1111 1111 1111 1111 1111 1111 1111 1111 1111 1111 1111 1111 1111 1111 1111 1111 1111
#> 7 2013     1     1 15:01:00 15:00:00         0  B6 1111 1111 1111 1111 1111 1111 1111 1111 1111 1111 1111 1111 1111 1111 1111 1111 1111 1111 1111
#> 8 2013     1     1 15:01:00 15:00:00         0  B6 1111 1111 1111 1111 1111 1111 1111 1111 1111 1111 1111 1111 1111 1111 1111 1111 1111 1111 1111
#> 9 2013     1     1 15:01:00 15:00:00         0  B6 1111 1111 1111 1111 1111 1111 1111 1111 1111 1111 1111 1111 1111 1111 1111 1111 1111 1111 1111
#> 10 2013     1     1 15:01:00 15:00:00         0  B6 1111 1111 1111 1111 1111 1111 1111 1111 1111 1111 1111 1111 1111 1111 1111 1111 1111 1111 1111
#> #> # A tibble: 336,776 x
#>   year   month   day dep_time sched_dep_time   dep_delay arr_time   arr_delay carrier flight   tailnum origin dest distance air_time  time_hour
#>   <dbl> <dbl> <dbl> <chr>         <chr>           <dbl> <chr>         <dbl> <chr> <chr> <chr> <chr> <chr> <dbl> <dbl> <chr>
```

Рис. 6. Перегляд інформації в датасеті flights

Завантажимо таблицю *flights* в локальний Spark-кластер. Для цього використовується функція *copy_to()*, якій передається створений раніше об'єкт *sc* і таблиця *flights*. Результат відображений на рис. 7.

```
> #! <- copy_to(sc, flights)
# Source: spark<flights> [?? x 19]
#>   year month   day dep_time sched_dep_time   dep_delay arr_time   arr_delay carrier flight   tailnum origin dest distance air_time  time_hour
#>   <dbl> <dbl> <dbl> <chr>         <chr>           <dbl> <chr>         <dbl> <chr> <chr> <chr> <chr> <chr> <dbl> <dbl> <chr>
#> 1 2013     1     1 15:01:00 15:00:00         0  B6 1111 1111 1111 1111 1111 1111 1111 1111 1111 1111 1111 1111 1111 1111 1111 1111 1111 1111
#> 2 2013     1     1 15:01:00 15:00:00         0  B6 1111 1111 1111 1111 1111 1111 1111 1111 1111 1111 1111 1111 1111 1111 1111 1111 1111 1111 1111
#> 3 2013     1     1 15:01:00 15:00:00         0  B6 1111 1111 1111 1111 1111 1111 1111 1111 1111 1111 1111 1111 1111 1111 1111 1111 1111 1111 1111
#> 4 2013     1     1 15:01:00 15:00:00         0  B6 1111 1111 1111 1111 1111 1111 1111 1111 1111 1111 1111 1111 1111 1111 1111 1111 1111 1111 1111 1111
#> 5 2013     1     1 15:01:00 15:00:00         0  B6 1111 1111 1111 1111 1111 1111 1111 1111 1111 1111 1111 1111 1111 1111 1111 1111 1111 1111 1111 1111
#> 6 2013     1     1 15:01:00 15:00:00         0  B6 1111 1111 1111 1111 1111 1111 1111 1111 1111 1111 1111 1111 1111 1111 1111 1111 1111 1111 1111 1111
#> 7 2013     1     1 15:01:00 15:00:00         0  B6 1111 1111 1111 1111 1111 1111 1111 1111 1111 1111 1111 1111 1111 1111 1111 1111 1111 1111 1111 1111
#> 8 2013     1     1 15:01:00 15:00:00         0  B6 1111 1111 1111 1111 1111 1111 1111 1111 1111 1111 1111 1111 1111 1111 1111 1111 1111 1111 1111 1111
#> 9 2013     1     1 15:01:00 15:00:00         0  B6 1111 1111 1111 1111 1111 1111 1111 1111 1111 1111 1111 1111 1111 1111 1111 1111 1111 1111 1111 1111
#> 10 2013     1     1 15:01:00 15:00:00         0  B6 1111 1111 1111 1111 1111 1111 1111 1111 1111 1111 1111 1111 1111 1111 1111 1111 1111 1111 1111 1111
#> #> # A tibble: 336,776 x
#>   year month   day dep_time sched_dep_time   dep_delay arr_time   arr_delay carrier flight   tailnum origin dest distance air_time  time_hour
#>   <dbl> <dbl> <dbl> <chr>         <chr>           <dbl> <chr>         <dbl> <chr> <chr> <chr> <chr> <chr> <dbl> <dbl> <chr>
```

Рис. 7. Завантаження датасету flights в Spark-кластер

З'ясуємо загальну кількість рейсів з кожного аеропорту. Для цього виконаємо запит до даних в Spark-кластері з середовища R, використовуючи SQL-запит. Для виконання SQL-запиту було завантажено пакет *DBI* і використано функцію *dbGetQuery()*:

```
> require(DBI)
Loading required package: DBI
> q <- "SELECT `origin`, count(*) AS `N`
+ FROM `flights`
+ GROUP BY `origin`"
> dbGetQuery(sc, q)
  origin N
1  JFK 111279
2  EWR 120835
3  LGA 104662
```

Як бачимо, з аеропорту JFK було виконано 111279 рейсів, з аеропорту EWR – 120835 рейсів, а з аеропорту LGA – 104662 рейсів.

Виконаємо описану вище операцію за допомогою функції з пакета *dplyr*, а не SQL-запиту:

```
> true_result <- result %>% collect()
> true_result
# A tibble: 3 x 2
  origin N
  <chr> <dbl>
1 JFK 111279
2 EWR 120835
3 LGA 104662
> class(result)
[1] "tbl_spark" "tbl_sql" "tbl_lazy" "tbl"
> class(true_result)
[1] "tbl_df" "tbl" "data.frame"
```


Як бачимо, результатом виконання вищенаведеної команди є список з трьома значеннями. Щоб автоматично отримати ці значення зі списку, було використано Hive-функцію *explode()*:

```
> flights_tbl %>%
+ summarise(perc = percentile(dep_delay, array(0.25, 0.5, 0.75))) %>%
+ mutate(perc = explode(perc))
# Source: spark<?> [?? x 1]
  perc
<dbl>
1    -5
2    -2
3    11
>
```

Як результат, для 25% перцентиля маємо запізнення – 5 хв., а для 75% маємо 11 хв. Здійснимо розвідувальний аналіз даних в таблиці *flights_tbl*. Для початку з'ясуємо, чи є в наших даних пропущені значення. Виконаємо підрахунок пропущених значень для всіх стовпців таблиці *flights_tbl* за допомогою команди *summarise_each()* з пакету *dplyr* в поєднанні з анонімною функцією, яка задає логіку обчислень:

```
> flights_tbl %>%
+ summarise_each(list(~sum(as.integer(is.na(.)))) %>%
+ glimpse
Rows: ??
Columns: 19
Database: spark_connection
$ year <dbl> 0
$ month <dbl> 0
$ day <dbl> 0
$ dep_time <dbl> 8255
$ sched_dep_time <dbl> 0
$ dep_delay <dbl> 8255
$ arr_time <dbl> 8713
$ sched_arr_time <dbl> 0
$ arr_delay <dbl> 9430
$ carrier <dbl> 0
$ flight <dbl> 0
$ tailnum <dbl> 2512
$ origin <dbl> 0
$ dest <dbl> 0
$ air_time <dbl> 9430
$ distance <dbl> 0
$ hour <dbl> 0
$ minute <dbl> 0
$ time_hour <dbl> 0
Warning messages:
1: 'summarise_each()' was deprecated in dplyr 0.7.0.
```

This warning is displayed once every 8 hours. Call 'lifecycle::last_lifecycle_warnings()' to see where this warning was generated.
2: Missing values are always removed in SQL aggregation functions.
Use 'na.rm = TRUE' to silence this warning
This warning is displayed once every 8 hours.

Отже, для стовпців *dep_time*, *dep_delay*, *arr_time*, *arr_delay*, *tailnum*, *air_time* маємо пропущені значення в різних кількостях.

Максимальна кількість пропущених значень становить 9430 в стовпцях *arr_delay* та *air_time*. Всього в таблиці 336776 записів. 9430 від 336776 це 2.8%. Тобто максимальна кількість пропущених значень від загального числа спостережень становить 2.8%. Оскільки частка пропущених значень невелика, ми можемо видалити відповідні рядки з таблиці без особливого ризику вплинути на якість подальшого аналізу. Для цього було використано базову функцію *na.omit()*:

```
> flights_full <- flights_tbl %>% na.omit()
* Dropped 9430 rows with 'na.omit' (336776 => 327346)
```

Тож, було видалено 9430 рядків з пропущеними значеннями, загальна кількість рядків в таблиці з 336776 зменшилась до 327346. Знайдемо розмірність нової таблиці після вищенаведених операцій:

```
> flights_full %>% sdf_dim()
[1] 327346 19
```

Відповідно, маємо 19 стовпців та 327346 рядків. Оскільки нас цікавлять рейси, затримка яких склала від 15 до 30 хв. включно, то далі нам потрібно відфільтрувати дані відповідним чином. Додамо новий стовпець *target* зі значеннями залежної змінної:

```
> flights <- flights_full %>%
+ filter(dep_delay >= 15, dep_delay <= 30) %>%
+ mutate(target = as.integer(arr_delay <= 0))
> flights %>% sdf_dim()
[1] 24515 20
```

Отже, отримано таблицю з розмірністю в 20 стовпців та 24515 рядків. Спробуємо з'ясувати, які з наявних змінних корелюють із залежною змінною *target*. Логічно очікувати, що ймовірність прибуття затриманого рейсу за розкладом в значній мірі визначається відстанню між аеропортом вильоту і аеропортом прибуття (стовпець *distance*, який виражається в милях). Розрахуємо медіанне значення цієї відстані для обох класів залежної змінної:

```
> flights %>%
+ group_by(target) %>%
+ summarise(median_dist = percentile(distance, 0.5))
# Source: spark<?> [?? x 2]
  target median_dist
<int> <dbl>
1     1         1089
2     0           820
```

Чим більша відстань між аеропортами, тим більше шанс у затриманого рейсу надолужити згаяний час і прибути без запізнення. Можливість надолужити згаяний час може визначатися різними факторами, пов'язаними з авіакомпанією, яка виконує той чи інший рейс (досвід пілотів, характеристики літака тощо). Тому категоріальна змінна *carrier*, що містить скорочені назви авіакомпаній, також може виявитися корисним предиктором.

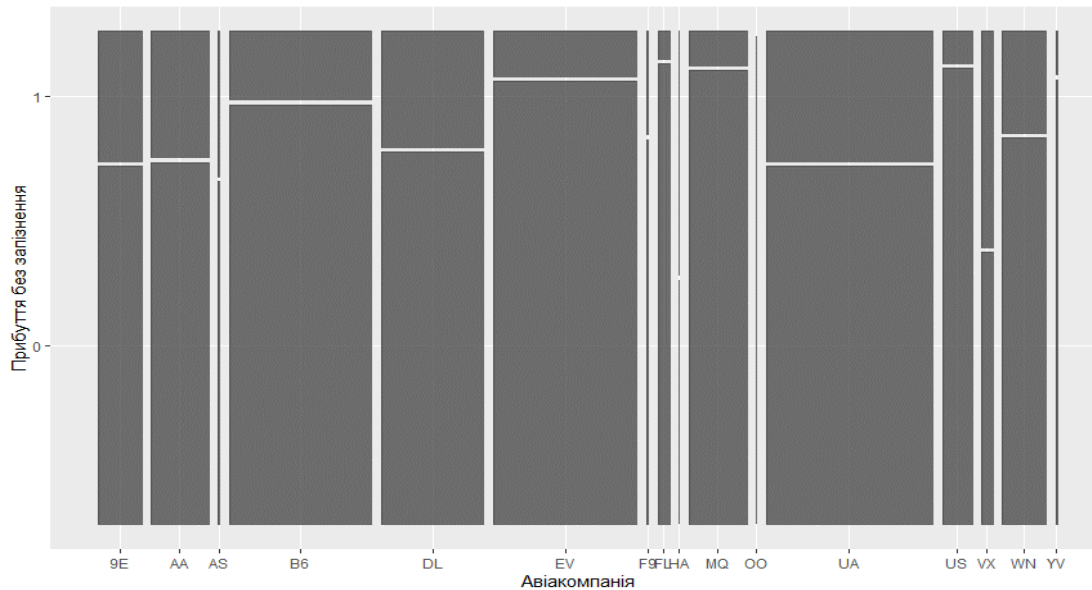


Рис. 9. Мозаїчна діаграма залежності затримки рейсів від авіакомпанії

Щоб зрозуміти, чи це так, згрупуємо дані за рівнями змінної `carrier` і підрахуємо кількість затриманих рейсів, які прибули із запізненням та без запізнення. Візуалізуємо дані з отриманої таблиці спряженості за допомогою мозаїчної діаграми, яка показана на рис. 9.

Для цього спочатку з середовища R надсилаємо інструкції для виконання обчислень у Spark-кластері, а потім імпортуємо отриманий результат в середовище R і вже продовжуємо аналіз звичайними для R засобами, у даному випадку – зображуємо дані графічно за допомогою `ggplot2` і `ggmosaic`:

```
> flights %>%
+   group_by(target, carrier) %>%
+   tally() %>%
+   collect %>%
+   ggplot() +
+   geom_mosaic(aes(product(target, carrier), weight = n)) +
+   labs(x = "Авіакомпанія", y = "Прибуття без запізнення")
```

Як бачимо вище, авіакомпанії можуть відрізнятися за часткою рейсів, які прибули без запізнення, в зв'язку з чим змінну `carrier` можна розглядати як потенційно корисний предиктор.

Висновки та подальша робота. У статті наведено особливості програмної реалізації технології Spark для розподілених обчислень з використан-

ням мови програмування R. У даному дослідженні було встановлено Spark на локальній машині та виконано розподілені обчислення для набору даних пакету `nycflights13` з використанням Spark-кластера у середовищі R як за допомогою запитів HiveQL, так і за допомогою можливостей бібліотеки R `dplyr`. Отримано дані після їх обробки в Spark кластері для виконання подальших обчислень, виконано розвідувальний аналіз засобами мови R для даних в датасеті, який містить таблиці з описом 336776 авіарейсів. Задача розподілених обчислень великих даних полягала у побудові моделі, яка передбачає ймовірність прибуття затриманого рейсу без запізнення. В рамках розвідувального аналізу було вилучено рядки з пропущеними значеннями. Дані були відфільтровані відповідно до умови задачі та додано змінну, яка позначає бінарну класифікацію відносно запізнення рейсу. Було встановлено, що відстань маршруту та авіакомпанія корелюють з тим, чи запізниться рейс. Для цього було обраховано медіану та побудовано мозаїчну діаграму. У подальшому планується дослідження аналогічним чином перспективних на думку автора програмних методів оброблення великих даних та прогнозування в режимі реального часу з використанням технологій та методів машинного навчання.

Список літератури:

1. Apache Hadoop. <https://hadoop.apache.org/>
2. HDFS Architecture. <https://hadoop.apache.org/docs/stable/hadoop-project-dist/hadoop-hdfs/HdfsDesign.html>
3. Apache Spark. <https://aws.amazon.com/big-data/what-is-spark/>
4. Apache Flink. <https://flink.apache.org/>
5. Apache Cassandra. <https://cassandra.apache.org/doc/latest/>

6. Apache Hive. <https://hive.apache.org/>
7. Jesús Camacho-Rodríguez, et al. Apache Hive: From MapReduce to Enterprise-grade Big Data Warehousing. International Conference on Management of Data (SIGMOD '19), June 30-July 5, 2019, Amsterdam, Netherlands, p. 1773–1786, <https://doi.org/10.1145/3299869.3314045>.
8. Samadi Y., Zbakh M., Tadonki C. Performance comparison between Hadoop and Spark frameworks using HiBench benchmarks. *Concurrency Computat: Pract Exper.* 2017; 43-67. <https://doi.org/10.1002/cpe.4367>
9. Gu L., Li H. Memory or time performance evaluation for iterative operation on Hadoop and Spark. In: IEEE 10th International Conference on HighPerformance Computing and Communications; 2013; Zhangjiajie.721-727.
10. Lin X, Wang P, Wu Log B. Analysis in cloud computing environment with Hadoop and Spark. In: 5th IEEE International Conference on Broadband Network and Multimedia Technology; November 2013; Guilin China. 273-276.

Oleshchenko L.M. SOFTWARE IMPLEMENTATION FEATURES OF SPARK TECHNOLOGY AND R PROGRAMMING LANGUAGE FOR BIG DATA DISTRIBUTED COMPUTING

The article discusses the features of the software implementation of Spark technology and the R programming language for distributed computing for the data set from the nycflights13 package of the R environment, which contains data with a description of 336,776 flights. Such features of the Spark technology as speed, support for analytics tools and scalability are considered, and a comparison of the use of Hadoop and Spark technologies for the implementation of iterative PageRank, K-Means and LR algorithms is given. Distributed computing allows efficient processing and analysis of large volumes of data that exceed the capabilities of a single server. Distributed systems enable horizontal scaling and work with large amounts of data using multi-node clusters. With distributed computing, organizations can leverage the power of parallel processing for complex calculations and make data-driven decisions in a timely manner. The distributed nature of such systems provides fault tolerance and redundancy, ensuring continuity of data processing even in the event of hardware or software failures. In general, distributed computing is necessary to solve the problems that arise when working with large volumes of data and allows organizations to use their potential. Apache Spark technology is one of the most popular platforms for distributed big data computing. Spark technology uses memory for intermediate calculations, which significantly speeds up data operations compared to other distributed computing systems. Spark also supports various programming languages, including Java, Scala, Python, and R, and provides high-level APIs for working with data, such as RDD (Resilient Distributed Dataset) and DataFrame. Spark includes modules for machine learning (Spark MLlib), streaming data processing (Spark Streaming), and graph computing (GraphX), which allows perform a variety of analytics tasks on a single platform. The article provides examples of how Spark works on clusters of various sizes with automatic computation distribution and data storage, which allows for easy scaling of processing large volumes of data. Spark provides mechanisms for fault tolerance and data recovery in the event of hardware failures or software errors.

Key words: software, big data, data processing, analysis, Spark, distributed computing, DataFrame, R programming language, HiveQL.

Omechenko V.V.

National Technical University of Ukraine “Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute”

Rolik O.I.

National Technical University of Ukraine “Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute”

INTEGRATION OF PROACTIVE AND REACTIVE APPROACHES TO SCALING IN KUBERNETES

This article is devoted to developing a method for integrating proactive and reactive approaches to automate scaling computing resources in a Kubernetes cluster. A proactive approach allows you to scale cluster resources in advance and release them only after passing the peak load, which reduces the risk of service quality deterioration and significantly reduces unprofitable resource reservation. However, the main drawback of this method is the inability to adapt to abnormal loads directly during operation. Although the reactive approach is less effective in typical situations, it continues functioning in the standard mode under abnormal loads. Therefore, a hybrid approach – which includes reactive and proactive components – will effectively manage resources under typical loads and continue functioning in abnormal conditions. This paper considers a solution for automatic horizontal scaling, which includes a developed proactive component in combination with an existing solution for reactive horizontal scaling in Kubernetes, namely the Horizontal Pod Autoscaler. This work describes problems that may arise when developing hybrid solutions, in particular, the problem of determining the moment of switching between components, and possible options for their solution are given. Experiments are conducted in the article to verify the developed solution. The first experiment shows the ability to move to proactive management if the required accuracy of predictions is obtained. Also, this experiment allows you to compare the proactive and reactive approaches with each other in the context of service quality and unprofitable resource reservation. The second experiment demonstrates the ability to detect abnormal workload and switch to the reactive component. The speed of reaction to anomalies and the overall impact on service quality indicators are also evaluated.

Key words: dynamic management of computing resources, proactive scaling, reactive scaling, Kubernetes, Horizontal Pod Autoscaler.

Formulation of the problem. Proactive scaling methods are more effective than reactive scaling methods in the context of managing computing resources in information systems for several reasons [1]. First, this approach allows you to scale applications in advance during peak loads by analyzing historical data, which significantly reduces the risk of deterioration in quality of service (QoS). Secondly, this approach significantly reduces overprovisioning due to a more accurate calculation of the required amount of computing resources and advance planning of downscaling. When using the reactive approach, upward scaling is performed when the load peak occurs [2]. Given the time required to deploy and initialize the application, this can lead to a temporary critical drop in service quality, including complete failure. However, the proactive approach, unlike the reactive one, is not self-sufficient and has several prerequisites for effective operation.

Any proactive scaling solution is based on time-series analysis methods that identify seasonality,

trends, recurring patterns, and other features of the target application's load. The presence of anomalies in historical data, which can be caused by data loss, network problems, or denial of service, can significantly affect the accuracy of predictions. In addition, a proactive scaler cannot perform its functions when an abnormal load occurs directly during operation. One possible solution to this problem is to use reactive scaling in situations where the proactive approach is ineffective. When integrating these two approaches, several tasks need to be solved. In particular, it is necessary to define an indicator that will signal that the proactive component is ineffective at some point in time, and it is necessary to apply the reactive one [3]. It is also necessary to define an indicator for reverse switching from reactive to proactive. In addition, it is necessary to ensure that the reactive component is activated quickly to reduce the duration of QoS degradation.

This paper focuses on the problem of combining reactive and proactive approaches to

scaling. Nowadays, Kubernetes provides all the necessary tools and capabilities for automating resource management processes and is the de facto orchestration standard, so potential solutions to this problem are explicitly considered for the Kubernetes environment. **The purpose of this paper** is to improve the characteristics of proactive and reactive scaling solutions by integrating them into a single subsystem of computing resource management.

Analysis of recent research and publications. In [4], the authors present the CloudScale solution for managing computing resources for multi-tenant cloud systems. This solution includes both proactive and reactive components that can work together or separately in the respective modes of operation. The predictive component is based on fast Fourier transforms to find similar load patterns, after which Markov chains are applied to identify the current state of the application and the required transition. The reactive component, in turn, calculates the error between the current amount of reserved resources and the required amount, based on which the amount of allocated resources is adjusted. Thus, the reactive component performs a corrective function. On different datasets, these components in pairs have shown better results than each of them separately.

In another paper [5], the authors propose another option for integrating the reactive and proactive approach, namely, scaling up is reactive, and scaling down is proactive. The reactive component constantly analyzes the current metrics of the speed of response to requests. If these metrics violate the Service Level Agreement (SLA), upward scaling occurs. The proactive component, which is based on a regression model, prevents the premature release of reserved resources. The results of experiments conducted on synthetic data demonstrate the ability of this solution to adapt to simple load patterns.

A similar approach for horizontal scaling is proposed in [6, 7]. In this paper, two independent controllers are used. The reactive controller is responsible for scaling up, and the proactive controller is responsible for scaling down. However, in these works, the authors conclude that if there is a significant period of application initialization, the reactive controller loses its effectiveness, and the proactive approach shows much better results.

The works on hybrid scaling in Kubernetes are currently not widespread [8]. Therefore, this topic requires more research.

Outline of the main material of the study. The developed solution for managing computing resources includes reactive and proactive components. To

simplify the experiments and presentation of the results, only CPU time management and horizontal scaling are considered in this paper.

The application developed in this paper solves the problem of horizontal scaling of applications in Kubernetes, which is to manage the number of replicas of a selected application to ensure the required level of QoS metrics and minimize wasted resources. Some application X , which at any time t has a given number of replicas $R_t - X_1 \dots X_{R_t}$ that process requests. The total amount of CPU time required to process requests at any given time t is described by the load function $W_{CPU}(t)$. When scaling horizontally, the application X has constant requests C_X for CPU time. In this case, at any time t , the following equality must be satisfied to minimize unprofitable reservation of CPU time and maintain the required level of QoS:

$$R_t * C_X = W_{CPU}(t). \quad (1)$$

In this work, the proactive approach is used as the main one since, provided that high accuracy predictions are obtained, it allows the application to scale up prematurely to ensure the required level of service quality, as well as to release the reserved resources only after the peak loads are over. However, in cases where the accuracy of the predictions is not high, the proactive component significantly loses its effectiveness. The reactive component should be activated if the accuracy of the predictions is critically low and, accordingly, transfer control to the proactive component when the required accuracy is reached. An essential characteristic of both components is the ability to work in the observation mode – to collect and process metrics and calculate the required number of replicas but not apply the obtained values to the application. For example, if the accuracy of predictions drops, this will allow you to quickly switch to reactive management and continue processing requests as usual.

One of the main problems studied in this paper is determining when to transfer control between components. While there are no prerequisites for a reactive approach, a proactive approach depends on the accuracy of the predictions made. If anomalies appear in the load pattern, the prediction algorithm may lose accuracy. An indicator of the need to switch from a proactive to a reactive approach can be [9]:

1. Underestimation or significant overestimation of the number of application replicas over several iterations which allows you to quickly identify the difference between the actual workload and the forecast. Verification over several iterations, although it increases the response time, allows you to be sure of the final result.

2. Low accuracy of the prediction model obtained by splitting historical data into training and evaluation parts. In order to quickly detect an abnormal situation, this approach requires constant retraining and re-evaluation of the model, which can require significant computing resources and time.

3. Drop in QoS metrics, such as response time. The difficulty of this approach lies in finding a metric that unambiguously identifies problems with resource allocation.

In this paper, we use the first approach because it is easy to implement and allows us to quickly identify and fix the problem of dynamic allocation of computing resources.

When a given solution is initialized to automate the scaling of an application, previous resource utilization metrics may not be available. In this case, due to the impossibility of applying a proactive approach, the management is transferred to the reactive component.

The proactive component is based on the Prophet prediction algorithm. Prophet [10] is a time series prediction library developed by Facebook. The main goal of the development was to create a simple, transparent, and understandable model-generation algorithm that would allow us to obtain reliable predictions quickly.

This algorithm is based on an additive regression model that has several components:

$$y(t) = g(t) + s(t) + h(t) + e(t), \quad (2)$$

where $g(t)$ is the trend component, $s(t)$ is the seasonal component, $h(t)$ is the anomalous component, and $e(t)$ is the error function. In addition to the additive regression model, Prophet also uses a Fourier transform.

Historical data on resource utilization is obtained by querying the Prometheus server. To get resource utilization metrics, in particular CPU, the query of the form `sum(rate(container_cpu_usage_seconds_total{container!=""}[1m])) by (pod)` is used. To get the currently specified requests, the Kubernetes API is used, namely the `sum(spec.container[].requests.cpu)` attribute in the deployment manifest [11].

The advantages of this model include the ability to work with a variety of time series, the ability to work efficiently with large data sets and missing data, and flexibility in customization. This algorithm has the ability to detect seasonality, trends, and anomalies in time series automatically.

When developing a solution for horizontal scaling, an additional parameter must be taken into account, namely the application initialization time. This value can be determined automatically, but since it will have a significant impact on the scaler's

performance, it should be set by the user. For example, when initializing a web application, it is necessary to establish connections to other services and databases. Also, Kubernetes needs additional time to place a pod on a node, obtain an image, and perform readiness checks. Therefore, this solution allows you to set the `initializationTime` parameter, which the proactive component uses to plan upward scaling.

For reactive scaling, HPA is used – a built-in solution for automating horizontal scaling in Kubernetes [12]. HPA receives system metrics of resource utilization from the metrics-server. The main setting `targetAverageValue` or `targetAverageUtilization` is responsible for the desired load per application replica. HPA calculates the current load value as the average value among all the pods of the target deployment in the Running status. The controller continuously monitors the status of the pods and the current average load, calculating the desired number of replicas with $desiredReplicas = ceil[currentReplicas * (currentMetricValue / targetMetricValue)]$. If the actual and desired values differ, the application is scaled. HPAs may have a cooldown period to prevent rapid, oscillating scaling decisions. During this period, no further scaling decisions are made. Also, this component allows you to configure the minimum and maximum values of the number of replicas in order to avoid over-scaling or under-scaling.

To minimize the switching time from the proactive to the reactive component, HPA operates in the observation mode, which is achieved by setting the `selectPolicy` parameter to disabled for the `scaleDown` and `scaleUp` control policies.

While the reactive component is running, the proactive component constantly collects historical usage data and calculates the optimal number of replicas. If, within a certain number of iterations, which can be configured, the calculated values correspond to the actual needs, then control is transferred to the proactive component. Accordingly, if the provided values of the number of replicas are insufficient or significantly exceed the required number (>50%), the reverse operation is performed.

Experiments. To evaluate the quality of the developed solution, two experiments were conducted on a minikube cluster [13], including one node with 12 processor cores and 16 GB of RAM. All applications are hosted on the same physical machine.

The workload is generated using locust, which allows you to send requests according to a predefined scenario [14]. The test application can be scaled both horizontally and vertically. For each received request, some CPU-intensive task is performed.

The test application has a query limit of 200 millicores. In addition, when scaling reactive, setting limits higher than requests is essential. On the one hand, this may affect other applications on the same node, but it is a general practice not to load nodes with more than 80–90% of the maximum capacity of computational resources. Setting limits allows you to better estimate the number of application replicas required in cases with a rapidly growing load. Otherwise, the application will be significantly limited in the use of CPU time, which will significantly degrade QoS and interfere with the assessment of the required number of application replicas. In the case of limitations on setting limits, it is necessary to take into account an additional metric that shows the throttling of the application, which is not always correct. In this experiment, the limits were set at 250 millicores.

To approximate real-world applications, the test application requires a 10-second initialization interval. This is necessary for image download, volume attachment, and initialization of the main application components. Since minikube is used for testing, all the necessary data is contained on one machine, so there are no network delays.

To improve the representativeness of the experiments, we also further reduced the global period for collecting system metrics by setting the *metricResolution* value to 15 seconds as kubelets work with same frequency. Also, the *scaleUp* and *scaleDown* scaling policies in HPA were edited to reduce the reaction time to changes in workloads.

The developed solution is launched in the first experiment without any previous history. The load period is 5 minutes and varies from 20 to 100 requests per second. Figure 1 shows the results of the experiment. In the beginning, resource management is performed by the reactive component, which is why there are high response times at the peak moments. After three

periods of seasonal load, the proactive component is able to accurately calculate the required number of replicas and takes over. Starting from the 800th second of the experiment, the response time at the moment of peaks onset decreases significantly, which corresponds

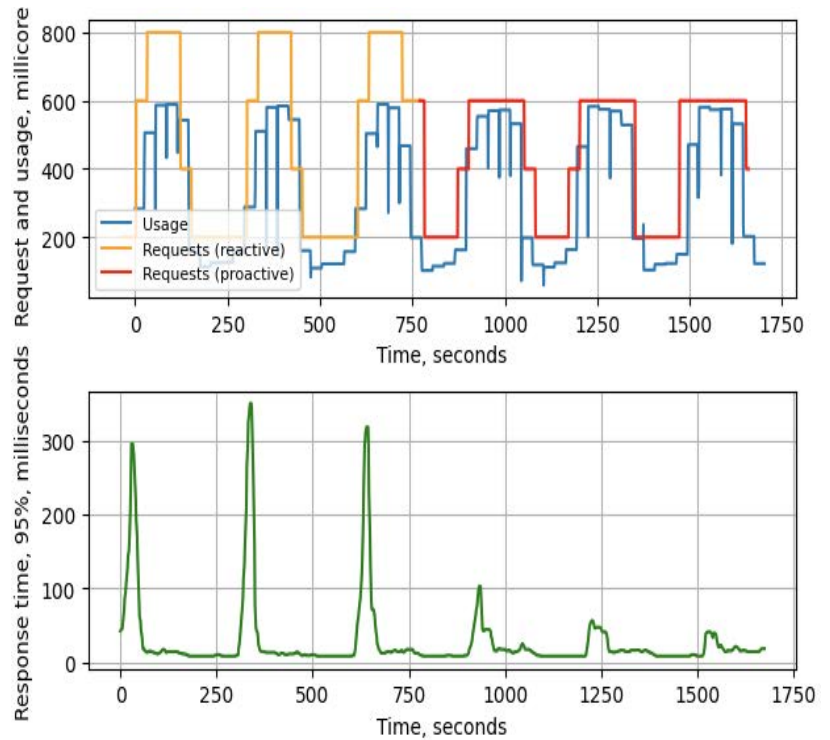


Fig. 1. The example of the transition from reactive to proactive management

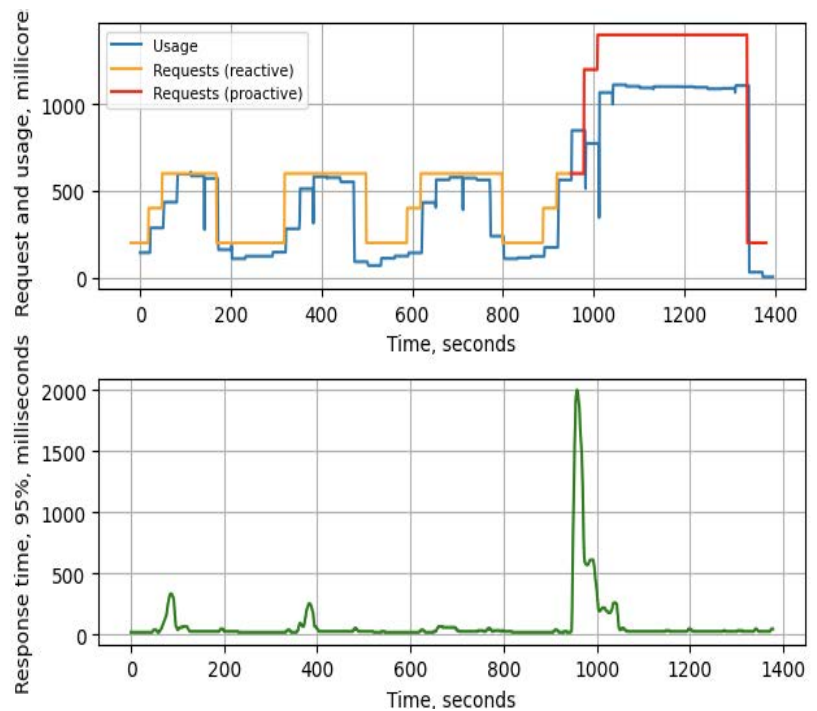


Fig. 2. An example of switching from proactive to reactive control with an atypical load pattern

to the time when control is transferred to the proactive component.

It's worth noting that the 95th percentile response time with proactive scaling is 210% better than with reactive scaling. In addition, proactive scaling used 11% less CPU time.

The second experiment demonstrates the ability to reverse the transition. Initially, the control is performed by the reactive component, but after the appearance of an atypical load, the control is transferred to the reactive component. The results are shown in Figure 2.

At about 950 seconds, an atypical load arrives, causing a critical drop in QoS. After several iterations of the proactive component, which missed the required number of replicas, a decision is made to transfer control to the reactive component. After that, scaling up to 7 pods immediately occurs, which

should be enough to process all received requests. The response time, in this case, is about 20 seconds. At this interval, this atypical situation led to a significant increase in the 95th percentile of response time – from 80 milliseconds to 173. However, given that such abnormal situations are generally rare, the impact on the overall response time is not significant.

Conclusions. In this paper, we have demonstrated a solution for hybrid scaling in Kubernetes. Although the performance of the proactive approach is much better – 210% less response time and 11% less unprofitable reservation of computing resources – it cannot perform its functions correctly in atypical situations, as demonstrated in the second experiment. A method for identifying the need to switch between components was proposed. In future work, this approach can be applied for vertical scaling.

Bibliography:

1. Omelchenko V. V., Rolik O.I. Automation of resource management In information systems based on reactive vertical scaling. *Адаптивні системи автоматичного управління*. 2022. №41. P. 65–78.
2. Omelchenko V. V., Rolik O. I. Workloads prediction methods for proactive resource scaling in Kubernetes. III International Scientific Symposium “Intelligent Solutions” (IntSol-2023). 2023.
3. Straesser M., Grohmann J., von Kistowski J., Eismann S., Bauer A. i Kounev S. Why is it not solved yet. *Proceedings of the 2022 ACM/SPEC on International Conference on Performance Engineering*. 2022.
4. Shen Z., Subbiah S., Gu X., Wilkes J., Cloudscale: Elastic resource scaling for multi-tenant cloud systems. *Proceedings of the 2nd ACM Symposium on Cloud Computing*. 2011.
5. Iqbal W., Dailey M. N., Carrera D., i Janecek P. Adaptive resource provisioning for read intensive multi-tier applications in the cloud. *Future Generation Computer Systems*. № 27. 2011. P. 871–879.
6. Ali-Eldin A., Kihl M., Tordsson J., Elmroth E. Efficient provisioning of bursty scientific workloads on the cloud using adaptive elasticity control. *Proceedings of the 3rd workshop on Scientific Cloud Computing Date - ScienceCloud '12*. 2012. New York. P. 31.
7. Ali-Eldin A., Tordsson J., Elmroth E. (2012) An adaptive hybrid elasticity controller for cloud infrastructures. *Network Operations and Management Symposium (NOMS)*. 2012. P. 204–212.
8. Lorigo-Botran T., Miguel-Alonso J., Lozano J. A. A Review of Auto-scaling Techniques for Elastic Applications in Cloud Environments. *Journal of Grid Computing*. 2014. Вип. 12. №4. P. 559–592.
9. Qu C., Calheiros R. N., Buyya R. Auto-Scaling Web Applications in Clouds. *ACM Computing Surveys*. 2018. Вип. 51. № 4. P. 1–33.
10. Taylor S. J., Letham B. Forecasting at scale. *PeerJ*. URL: <https://doi.org/10.7287/peerj.preprints.3190v2> (date visited: 25.09.2023).
11. Deployment Controllers. *Kubernetes Documentation*. URL: <https://kubernetes.io/docs/concepts/workloads/controllers/deployment/>. (date visited: 25.09.2023).
12. Horizontal Pod Autoscaler. *Kubernetes Documentation*. URL: <https://kubernetes.io/docs/tasks/run-application/horizontal-pod-autoscale/>. (date visited: 25.09.2023).
13. Minikube Documentation. URL: <https://minikube.sigs.k8s.io/docs/>. (date visited: 25.09.2023).
14. Locust. *Locust GitHub Repository*. URL: <https://github.com/locustio/locust>. (date visited: 25.09.2023).

Омельченко В.В., Ролік О.І. ІНТЕГРАЦІЯ ПРОАКТИВНОГО І РЕАКТИВНОГО ПІДХОДІВ ДО МАСШТАБУВАННЯ В KUBERNETES

Робота присвячена розробці методу інтеграції проактивного і реактивного підходів для автоматизація процесу масштабування обчислювальних ресурсів у кластері Kubernetes. Проактивний підхід дозволяє завчасно масштабувати ресурси кластеру і звільняти їх лише після проходження піку навантаження, що зменшує ризик погіршення якості обслуговування і значно зменшує збиткове резервування ресурсів. Проте, головним недоліком такого методу є неможливість адаптації до аномальних навантажень безпосередньо під час роботи. Хоча реактивний підхід і є менш ефективним

в типових ситуаціях, при аномальних навантаженнях продовжує функціонувати в стандартному режимі. Тому гібридний підхід – який включає реактивну і проактивну складові – дозволить ефективно розподіляти ресурси при типових навантаженнях і продовжувати функціонування в аномальних умовах. В роботі розглядається рішення для автоматичного горизонтально масштабування, яке включає розроблений проактивний компонент в поєднанні з існуючим рішенням для реактивного горизонтального масштабування в Kubernetes, а саме Horizontal Pod Autoscaler. В даній роботі проаналізовано проблеми, які можуть виникнути при розробці гібридних рішень, зокрема, проблема визначення моменту перемикання між компонентами та наводяться можливі варіанти їх вирішення. В статті проводяться експерименти для перевірки розробленого рішення. Перше дослідження показує здатність переходити до проактивного управління, якщо необхідна точність передбачень отримана. Також даний експеримент дозволяє порівняти проактивний і реактивний підхід між собою в контексті якості обслуговування та збиткового резервування ресурсів. Друге дослідження демонструє здатність визначати аномальне навантаження і вмикати реактивний компонент. Також оцінюється швидкість реагування на виникнення аномалій і загальний вплив на показники якості обслуговування.

Ключові слова: динамічне управління обчислювальними ресурсами, проактивне масштабування, реактивне масштабування, Kubernetes, Horizontal Pod Autoscaler.

Павленко В.П.Український науково-дослідний інститут спеціальної техніки та судових експертиз
Служби безпеки України**Дроздюк В.А.**Український науково-дослідний інститут спеціальної техніки та судових експертиз
Служби безпеки України

МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ЖИВЛЕННЯ БЕЗПЛОТНИХ ЛІТАЛЬНИХ ПРИСТРОЇВ ДАЛЬНЬОГО РАДІУСА ДІЇ

Розглянуто сучасні підходи, що використовуються при побудові безпілотних літальних апаратів дальнього радіусу дії. Вказано методи, що використовуються для забезпечення стратосферного польоту у автономному режимі, а також вказано сфери застосування відповідного класу авіаційних систем у галузі аерозйомки та ретрансляції радіосигналу. Зазначено, що ключовою проблемою, яку необхідно вирішити, є організація системи живлення літального апарату. Це вимагає впровадження підсистем сонячних елементів і електричних акумуляторів, а також ефективного розподілу накопиченої енергії та автоматичного керування польотом, що залежить від конструкції літального апарату, умов польоту і поставлених завдань. Розглянута модель відповідної авіаційної системи, що базується на крилатому літальному апараті незмінної стрілоподібності і незмінної маси, що виконує горизонтальний політ. При подальшому розширенні базової моделі та формуванні математичного апарату визначались особливості виконання стандартних маневрів, а також зміна маси літального апарату, що включає у себе визначення підйімальної сили, аеродинамічного опору, тяги і моменту тангажу на основі показників загальної площі крил, довжини хорди аеродинамічного профілю, моменту тангажу, залежності густини повітря від швидкості польоту. Представлена методика ефективного розподілу накопиченої енергії на основі алгоритмів автоматичного керування польотом за допомогою математичного апарату, що надає можливість ефективно використовувати сонячну енергію для зарядки акумуляторів та подальшого живлення рушійної системи. Перехід між режимами розподілу енергії розраховується на основі усереднення функції потужності сонячного випромінювання у часі та визначення порогового значення потужності підсистеми живлення від системи сонячних елементів і попередньої оцінки ефективності розподілу електроенергії, що включає у себе врахування втрат системою акумуляторів. Для розрахунку потужності сонячних елементів, як цільової функції, використовувались поточні показники інтенсивності сонячного випромінювання та кута падіння променів на поверхню фотоелементів. Проведення розрахунків з використанням математичних моделей дозволяє перетворити задачу оптимізації системи розподілу накопиченої енергії та автоматичного керування польотом на задачу пошуку екстремуму цільової функції за допомогою чисельних методів. Цей підхід надає можливість здійснити оптимальний розподіл ресурсів та точно контролювати процеси в авіаційній системі.

Ключові слова: безпілотні авіаційні системи, стратосферний політ, автономне живлення, система фотоелементів, система акумуляторів, рушійна система, параметрична модель.

Постановка проблеми. На сьогоднішній день, організація авіаційних систем, що складаються з безпілотних літальних апаратів (Unmanned Aerial Vehicle, UAV) дальнього радіусу дії з високим часом автономної роботи за умов польоту у стратосферному просторі (High-Altitude Long Endurance, HALE) вважається надзвичайно ефективним засобом для проведення аерозйомки (Aerial Survey, AS), у рамках розвідки та при виконанні картографічних робіт, а також ретрансляції радіосигналів (Signal Relay, SR) від базових станцій і масиву наземних ретрансляторів (рис. 1).

Дослідники зазначають, що UAV відповідного класу представляють альтернативу супутникового зв'язку та супутникової зйомки, що використовуються при вирішенні широкого спектру цивільних та військових завдань [1, 2]. Це пов'язано з тим, що зазначені авіаційні системи характеризуються меншими витратами на етапі виробництва і експлуатації, а також можливістю модифікацій після введення в експлуатацію та заміни складових компонентів. Це вказує на **високу актуальність** завдання розробки систем живлення HALE-UAV, а також забезпечення ефективного розподілу електроенергії та автоматич-

ного керування польотом у залежності від конструкції літального апарату за умов польоту у відповідності до поставленого завдання [1–8].

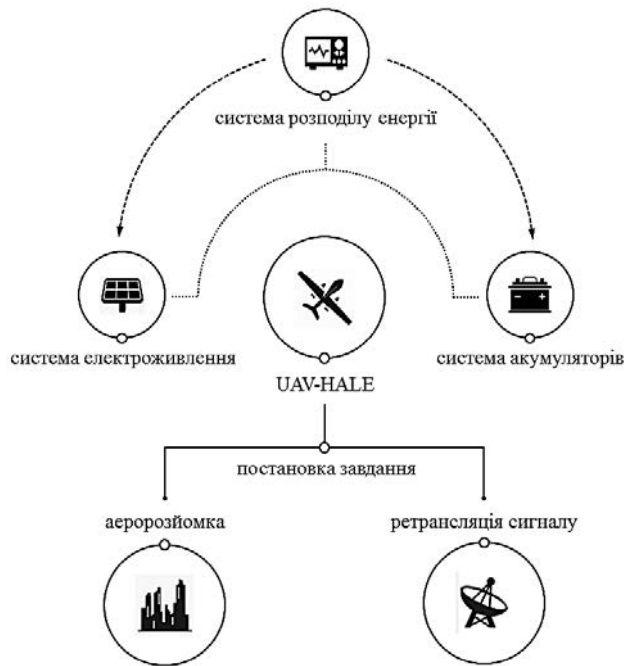


Рис. 1. Організація автономного польоту безпілотного літального пристрою дальнього радіусу дії з високим часом автономної роботи

Аналіз сучасних публікацій у профільних виданнях присвячених організації і експлуатації авіаційних систем [1–8], що складаються з безпілотних літальних апаратів класу HALE, зокрема NASA Helios [9, 10], ERAST [11] та Zephyr [12] вказує на актуальні підходи, які використовуються у зазначеній галузі і, таким чином, складають методологічну базу дослідження. При цьому зазначається, що основною задачею дослідження є організація системи живлення апарату на основі масиву сонячних елементів, що вкривають поверхню літального апарату та системи електричних акумуляторів, а також побудова алгоритму ефективного розподілу накопиченої електроенергії, у відповідності до особливостей стратосферного польоту в автономному режимі. При побудові вказаного алгоритму визначається конструкція літального апарату і проводиться розрахунок траєкторії польоту з застосуванням чисельних методів [13–21]. При цьому *невирішеною частиною загального дослідження* залишається відсутність цілісної методології організації системи аерозйомки та ретрансляції сигналу на основі HALE-UAV, що враховує повний набір факторів, які визначають режим роботи авіаційної системи.

Метою роботи, таким чином, стала розробка комплексної методики визначення аеродинаміч-

них характеристик літальних пристроїв і систем живлення, а також побудова і оцінка ефективності виконання програмних алгоритмів, які відповідають за розподіл електроенергії та контроль польоту авіаційних системи на базі HALE-UAV.

Виклад основного матеріалу

Розробка математичної моделі горизонтального польоту та маневрування безпілотного літального пристрою

Траєкторія руху літального апарату у вертикальній площині XY визначається через зміну положення по парі координат $\{dx / dt; dy / dt\}$, що надає можливість визначити вектор швидкості \vec{v} , і надалі по зміні швидкості у часі $\partial v / \partial t$ – прискорення \vec{a} . У свою чергу, у відповідності до залежності швидкості від часу $v(t)$ та густини повітря ρ_A , що залежить від висоти знаходження літального апарату визначається тиск вільного потоку (Free Stream Pressure, FSP) на нього Q_{FSP} :

$$Q_{FSP} = \frac{\rho_A(y) \cdot v^2}{2}. \tag{1}$$

На основі Q_{FSP} , коефіцієнту підйімальної сили (Lift Coefficients, LC), коефіцієнту аеродинамічного опору (Drag Coefficients, DC), як ϵ_L і ϵ_D , відповідно, а також загальної площі крил S_w розраховуються підйімальна сила F_L і аеродинамічний опір F_D . Нарешті, за допомогою F_L , ϵ_L і ϵ_D визначається тяга (Thrust Force, TF) як F_T :

$$F_T = \frac{\epsilon_D}{\epsilon_L} \cdot F_L, \tag{2}$$

що разом з силою тяжіння $P = mg$, що діє на літальний апарат, повністю визначає рух літального апарату, як це показано на рис. 2.

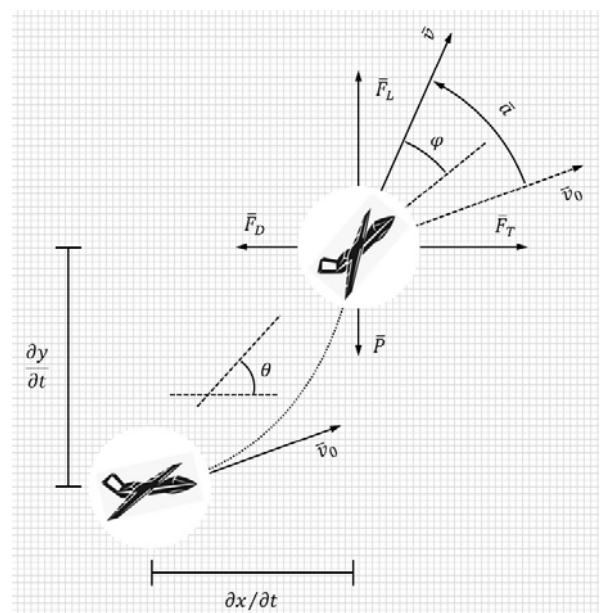


Рис. 2. Базова методика розрахунку аеродинамічних параметрів літального апарату

Аналогічним чином на основі загальної площі крил, функції тиску вільного потоку, коефіцієнту для моменту тангажу (Pitch Moment Coefficient, PMC) як ε_{PM} , довжини хорди l_{AF} аеродинамічного профілю (Airfoil, AF) може бути визначено момент тангажу:

$$M_p = Q_{FSP}(\rho_A, v) \cdot S_W \cdot \varepsilon_{PM} \cdot l_{AF}. \quad (2)$$

Траєкторія руху літального об'єкту у тривимірному просторі, таким чином, визначається через побудову системи диференціальних рівнянь для набору осей $\{OX; OY; OZ\}$, які визначають прискорення $a_{x,y,z} = \partial v_{x,y,z} / \partial t$ та частоту обертання як похідну по куту тангажу $\omega_{x,y,z} = \partial \theta_{x,y,z} / \partial t$ на основі значення кута атаки φ , а також F_D , F_T і F_L .

Організації системи живлення і розподілу електроенергії безпілотного літального апарату

Організація системи живлення і розподілу електроенергії безпілотного літального апарату класу «HALE» базується на визначенні обмежень у відповідності до поставленої задачі та зовнішніх умов у яких задача має бути виконана. Алгоритм розподілу електроенергії системи живлення полягає у визначенні режиму функціонування HALE-UAV, що має включати у себе процес зарядки системи акумуляторів та процес споживання електроенергії рушійною системою апарату, як це показано на рис. 3. З цією метою проводиться усереднення для фіксованого часового проміжку $t \in [t_{\downarrow}; t_{\uparrow}]$ та визначення порогового значення для потужності сонячного випромінювання як функції від часу $P_{Sol}(t)$, що надає можливість отримати значення $\bar{P}_{Sol} |_{t_i}^{t_f}$ і P_{Sol}^{TH} , відповідно:

$$P_{Sol}(t) \rightarrow \begin{cases} \bar{P}_{Sol} |_{t_i}^{t_f} = \frac{\int_{t_i}^{t_f} P_{SR} dt}{t_{\uparrow} - t_{\downarrow}} \\ P_{Sol}^{TH} = \min_{t \in [t_i; t_f]} (P_{Sol}(t)) \end{cases} \quad (3)$$

Крім того пропонується ввести величину P_{BPL} , що надає можливість оцінити потенційні втрати у потужності електроенергії системи живлення, що пов'язані з низькою ефективністю функціонування системи акумуляторів (Battery Power Losses, BPL). Для визначення режиму роботи системи живлення поточне значення $P_{Sol}(t)$ порівнюється з сумою $(\bar{P}_{Sol} |_{t_i}^{t_f} + P_{Sol}^{TH} + P_{BPL})$:

$$\begin{cases} P_{Sol}(t) \geq \bar{P}_{Sol} |_{t_i}^{t_f} + P_{Sol}^{TH} + P_{BPL} \\ \bar{P}_{Sol} |_{t_i}^{t_f} + P_{Sol}^{TH} < P_{Sol}(t) < \bar{P}_{Sol} |_{t_i}^{t_f} + P_{Sol}^{TH} + P_{BPL} \\ P_{Sol}(t) < \bar{P}_{Sol} |_{t_i}^{t_f} + P_{Sol}^{TH} \end{cases} \quad (4)$$

Це надає можливість виділити три режими функціонування системи живлення безпілотного літального апарату класу HALE:

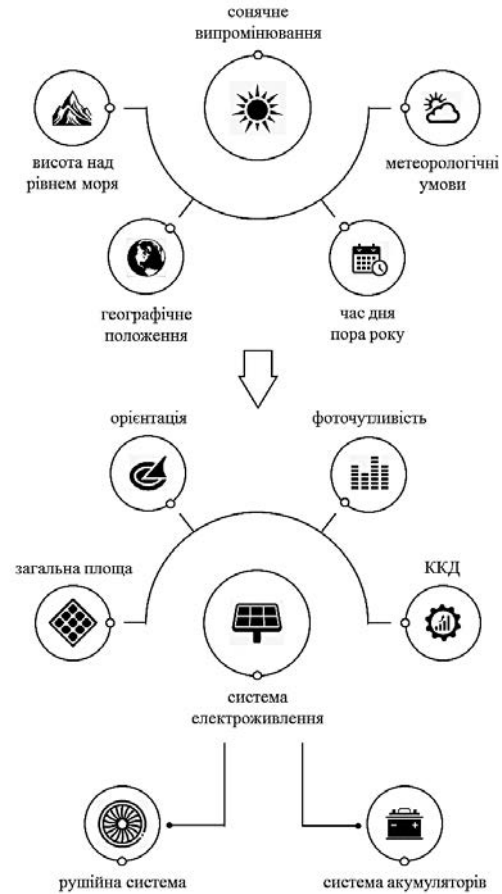


Рис. 3. Базова методика організації системи живлення і розподілу електроенергії HALE-UAV

1. Поточне значення потужності сонячного випромінювання, що лежить у діапазоні $P_{Sol}(t) \in [\bar{P}_{Sol} |_{t_i}^{t_f} + P_{Sol}^{TH} + P_{BPL}; \infty]$ відповідає введеному режиму зарядки акумуляторів та електроживлення рушійної системи від сонячних елементів.

2. Поточне значення потужності сонячного випромінювання, що лежить у діапазоні $P_{Sol}(t) \in [\bar{P}_{Sol} |_{t_i}^{t_f} + P_{Sol}^{TH}; (\bar{P}_{Sol} |_{t_i}^{t_f} + P_{Sol}^{TH} + P_{BPL})]$ відповідає введеному режиму електроживлення рушійної системи від сонячних елементів без зарядки акумуляторів.

3. Поточне значення потужності сонячного випромінювання, що лежить у діапазоні $P_{Sol}(t) \in [0; (\bar{P}_{Sol} |_{t_i}^{t_f} + P_{Sol}^{TH})]$ відповідає введеному режиму електроживлення рушійної системи від акумуляторів.

Функція $P_{Sol}(t)$ при цьому може прогнозуватись у відповідності до загальної площі безпілотного літального апарату, що вкрита сонячними елементами, кута падіння сонячних променів, спектру поглинання сонячних елементів, що залежить як від довжини хвилі, так і від кута падіння і ККД фотоелектричного перетворювача [22, 23]. Кут падіння і інтенсивністю сонячного випромінювання, у свою чергу визначається через гео-

графічне положення безпілотного літального апарату і висоту над рівнем моря, час дня і пору року, а також метеорологічні умови, що можуть бути оцінені для відповідного регіону. Математичне моделювання $P_{Sol}(t)$, таким чином, надає можливість звести задачу оцінки оптимальних параметрів конструкції, системи електроживлення, системи акумуляторів і рушійної системи HALE-UAV до задачі пошуку глобальних екстремумів цільових функцій, що відповідають ефективності функціонування безпілотного літального апарату.

Висновки. В результаті проведеного дослідження було розроблено комплексну методику

визначення аеродинамічних характеристик безпілотного літального апарату класу «HALE», що включає у себе визначення режимів функціонування системи живлення і розподілу електроенергії. При цьому у рамках дослідження було представлено:

- схему організації автономного польоту безпілотного літального пристрою дальнього радіусу дії з високим часом автономної роботи;
- методику розрахунку аеродинамічних параметрів безпілотного літального апарату;
- методику організації системи живлення і розподілу електроенергії HALE-UAV.

Список літератури:

1. Tarihi M., Mahdinejad Noori M., Madani M. Improving the performance of Hale UAV Communication Link through Mimo Cooperative Relay Strategy. *Wireless Personal Communications*. 2020. Vol. 113, No. 2. P. 1051–1071. DOI: 10.1007/s11277-020-07267-5.
2. Skarka W., Jałowiecki A. Automation of a thin-layer load-bearing structure design on the example of high altitude long endurance unmanned aerial vehicle (Hale UAV). *Applied Sciences*. 2021. Vol. 11, No. 6. P. 2645. DOI: 10.3390/app11062645.
3. Chaurasia R., Mohindru V. Unmanned Aerial Vehicle (UAV): A comprehensive survey. *Unmanned Aerial Vehicles for Internet of Things (IoT): Concepts, Techniques, and Applications* / eds.: V. Mohindru, Ya. Singh, R. Bhatt, A. K. Gupta. Beverly : Scrivener Publishing LLC, 2021. P. 1–27. DOI: 10.1002/9781119769170.ch1.
4. Mink R. Implementation and Evaluation of Unmanned Aerial Vehicles and Sensor Systems in Weed Research. Göttingen : Cuvillier Verlag, 2020.
5. Lagüela S., Díaz-Vilariño L., Roca D., Lorenzo H. Aerial thermography from low-cost UAV for the generation of thermographic digital terrain models. *Opto-Electronics Review*. 2015. Vol. 23, No. 1. P. 111-121. DOI: 10.1515/oere-2015-0006.
6. Zhang H., Song L., Han Z. Unmanned Aerial Vehicle Applications over Cellular Networks for 5G and Beyond. Cham : Springer International Publishing, 2020.
7. Mohiuddin A., Tarek T., Zweiri Y., Gan D. A survey of single and Multi-UAV aerial manipulation. *Unmanned Systems*. 2020. Vol. 08, No. 02. P. 119–147. DOI: 10.1142/s2301385020500089.
8. Militaru G., Popescu D., Ichim L. UAV to Satellite Communication Systems. *2019 IEEE Radio and Antenna Days of the Indian Ocean (RADIO)*, 23-26 September 2019. France, Reunion : IEEE, 2019. DOI: 10.23919/radio46463.2019.8968861.
9. Furfaro R., Ganapol B. D., Johnson L. F., Herwitz S. Model-based neural network algorithm for coffee ripeness prediction using Helios UAV aerial images. *Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering*. 2005. Vol. 5976. DOI: 10.1117/12.627420.
10. Dunbar B. Helios: Helios Prototype. *NASA: Dryden Flight Research Center*. URL: <https://www.nasa.gov/centers/dryden/news/ResearchUpdate/Helios> (Last accessed: 20.08.2023).
11. Yel E., Lin T. X., Bezzo N. Reachability-based self-triggered scheduling and replanning of UAV operations. *2017 NASA/ESA Conference on Adaptive Hardware and Systems (AHS)*, 24-27 July 2017. USA, Pasadena CA : IEEE, 2017. DOI: 10.1109/ahs.2017.8046382.
12. Swan T. G. Zephyr breaks own record for longest unmanned flight. *BBC News*. URL: <https://www.bbc.com/news/technology-62123819> (Last accessed: 20.08.2023).
13. Flight strategy optimization for high-altitude long-endurance solar-powered aircraft based on Gauss pseudo-spectral method / Wang S. et al. *Chinese Journal of Aeronautics*. 2019. Vol. 32, No. 10. P. 2286-2298. DOI: 10.1016/j.cja.2019.07.022.
14. Colas D., Roberts N. H., Suryakumar, V. S. Hale Multidisciplinary Design Optimization Part II: Solar-powered flying-wing aircraft. *2018 Aviation Technology, Integration, and Operations Conference*, June 25-29, 2018. Georgia, Atlanta, 2018. DOI: 10.2514/6.2018-3029.
15. Conceptual Design and Sizing of a Wing-Tip Extension Mechanism for HALE UAV / Joshi T. et al. *2019 International Conference on Nascent Technologies in Engineering (ICNTE)*, 04-05 January 2019. India, Navi Mumbai : IEEE, 2019. DOI: 10.1109/icnte44896.2019.8945964.

16. A fault tolerant control approach for the solar-powered Hale UAV / Wang P. et al. *2019 International Conference on Control, Automation and Diagnosis (ICCAD)*, 02-04 July 2019. France, Grenoble : IEEE, 2019. DOI: 10.1109/iccad46983.2019.9037939.
17. Xu B., Wang Y., Liu L. Multi-Stage Boost Aircraft Trajectory Optimization Strategy Based on HP Adaptive Gauss Pseudo Spectral Method. *2018 10th International Conference on Modelling, Identification and Control (ICMIC)*, 02-04 July 2018. China, Guiyang : IEEE, 2018. DOI: 10.1109/icmic.2018.8529869.
18. Klesh A. T., Kabamba P. T. Solar-powered aircraft: energy-optimal path planning and perpetual endurance. *Journal of Guidance, Control, and Dynamics*. 2009. Vol. 32, No. 4. P. 1320-1329.
19. Hwang S., Kim S., Lee Y. Developing high altitude long endurance (HALE) solar-powered Unmanned Aerial Vehicle (UAV). *Journal of Aerospace System Engineering*. 2016. Vol. 10, No. 1. P. 59–65. DOI: 10.20910/jase.2016.10.1.59.
20. Hwang H., Cha J., Ahn J. Solar UAV design framework for a HALE flight. *Aircraft Engineering and Aerospace Technology*. 2019. Vol. 91, No. 7. P. 927-937. DOI: 10.1108/aeat-03-2017-0093.
21. Liu X. D., Li S. L., Tang Y. Fuel System Configuration and Restructuring of MALE and HALE UAV. *Applied Mechanics and Materials*. 2015. Vol. 779. P. 268-276. DOI: 10.4028/www.scientific.net/amm.779.268.
22. Anikin P. S., Beliak Ie. V. Development of multispectral recording media for multilayer photoluminescent information recording. *Electronics and Information Technologies*. 2019. Vol. 12.
23. Kryuchyn A. A., Beliak Ie. V. Development of nanostructured luminophor coating for broadening of solar cell absorption spectrum. *Proc. SPIE: Next Generation Technologies for Solar Energy Conversion*. 2014. Vol. 9178.

Pavlenko V.P., Drozdyuk V.A. MATHEMATICAL MODELING OF LONG-ENDURANCE UNMANNED AERIAL VEHICLES POWER SUPPLY

This paper considers modern approaches used in the design of long-endurance unmanned aerial vehicles (UAVs). The methods employed for enabling stratospheric autonomous flights are discussed, along with their applications in aerial reconnaissance and radio signal relay. The key challenge to address is the organization of the UAV's power supply system, which requires the implementation of solar elements and electric accumulators, as well as efficient energy distribution and automatic flight control dependent on the UAV's design, flight conditions, and mission objectives. A model of the corresponding aviation system is presented, based on a constant aspect ratio and constant mass winged UAV performing horizontal flight. Further enhancements to the base model are explored, along with the development of a mathematical apparatus to determine the execution of standard maneuvers and changes in the UAV's mass, incorporating lift force, aerodynamic resistance, thrust, and pitch moment based on the wing's area, chord length of the aerodynamic profile, pitch moment, and air density as functions of flight speed. An effective energy distribution methodology is proposed, utilizing automatic flight control algorithms through the mathematical apparatus to efficiently utilize solar energy for charging accumulators and powering the propulsion system. The transition between energy distribution modes is calculated based on the time-averaged solar radiation function and threshold power values for the power supply subsystem, taking into account accumulator system losses. For calculating the power of solar elements as the target function, current indicators of solar radiation intensity and the angle of incidence of rays on the photovoltaic surface are employed. Utilizing mathematical models facilitates transforming the problem of optimizing the energy distribution system and automatic flight control into an extremum search problem of the target function through numerical methods. This approach allows for optimal resource allocation and precise control of processes in the aviation system.

Key words: *unmanned aerial vehicles, stratospheric flight, autonomous power supply, photovoltaic system, accumulator system, propulsion system, parametric model.*

Потрашкова Л.В.

Харківський національний економічний університет імені Семена Кузнеця

Літвінова О.А.

Харківський національний економічний університет імені Семена Кузнеця

ОБҐРУНТУВАННЯ ПРОЄКТНИХ РІШЕНЬ З ВІЗУАЛІЗАЦІЇ ПЕРСОНАЖІВ УКРАЇНСЬКОЇ МІФОЛОГІЇ ЗАСОБАМИ ДОПОВНЕНОЇ РЕАЛЬНОСТІ

Стаття присвячена застосуванню доповненої реальності для візуалізації персонажів української міфології. Використання доповненої реальності (Augmented Reality, AR) відкриває новий шлях для популяризації та збереження образів міфології, яка є важливою частиною національної культурної спадщини. Але розробка AR-проєктів є складним процесом, що базується на цілому ряді проєктних рішень, від яких залежить якість та успіх проєкту. Тому актуальним науковим завданням сьогодні є розробка теоретичних основ підтримки проєктних рішень у сфері застосування технології доповненої реальності для вирішення різноманітних завдань у сфері культурно-просвітницької діяльності.

Метою дослідження є розробка методики обґрунтування проєктних рішень щодо візуалізації персонажів української міфології з використанням доповненої реальності.

Відповідно до заданої мети, у статті розроблено методику, яка забезпечує підтримку прийняття рішень на різних етапі планування AR-проєкту у вигляді набору наявних альтернатив і їхніх оцінок з погляду різних критеріїв. Методика допомагає приймати обґрунтовані проєктні рішення з вибору: рекламаних міфічних персонажів, носіїв цільових зображень, складників AR-контенту, дизайну графічних елементів проєкту (цільових зображень та контенту доповненої реальності). Застосування методики дозволить підвищити якість розроблюваних проєктів з популяризації української міфології з використанням доповненої реальності.

У статті використано такі наукові методи: аналіз і синтез; анкетування; модель Кано; експертне ранжування альтернатив та перевірка узгодженості думок експертів; експертне оцінювання альтернатив за критеріями.

В цілому робота демонструє важливість та перспективність використання доповненої реальності для візуалізації культурної спадщини та міфологічних образів.

Ключові слова: *мультимедійний дизайн, доповнена реальність, українська міфологія, методика, модель Кано, анкетування, оцінювання альтернатив, ранжування.*

Постановка проблеми. Міфологія – одна з цінних складових культурної спадщини українського народу. Вона складається з унікальних персонажів, легенд і оповідань, що відображають культурні та історичні аспекти країни [1]. Незважаючи на підвищення інтересу в Україні та в усьому світі до української культурної спадщини, вітчизняна міфологія залишається мало відомою широким верствам населення. Тому сьогодні існує потреба у популяризації української міфології.

Для залучення до міфологічної тематики уваги широких верств населення доцільно використовувати інноваційні способи візуалізації міфічних персонажів, зокрема із використанням доповненої реальності (augmented reality, AR). Але розробка AR-проєктів є складним процесом, що базується на цілому ряді проєктних рішень, від яких зале-

жить якість та успіх проєкту. Тому актуальним науковим завданням сьогодні є розробка теоретичних і методичних основ підтримки проєктних рішень щодо використання технології доповненої реальності для вирішення різноманітних завдань у сфері культурно-просвітницької діяльності.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. На сьогоднішній день вже існує розвинене інформаційне забезпечення процесу створення доповненої реальності. Перш за все, наявно багато інформаційних інтернет-ресурсів з описанням варіантів програмного забезпечення для розробки доповненої реальності та інструкціями щодо їхнього застосування, зокрема [2–6]. Також підготовлені численні наукові огляди практики застосування технології доповненої реальності у різних сферах діяльності людини, зокрема у маркетингу, рекламі,

освітній та культурно-просвітницькій діяльності [7–12]. На цій основі розроблені теоретичні та методичні положення, рекомендації щодо застосування доповненої реальності для вирішення різних завдань комунікації. Зокрема, сформульовані етапи розробки AR-проектів та їхнє наповнення. Наприклад, у дослідженні [13] запропоновані такі чотири кроки розробки AR-проекту: 1) визначення цільової аудиторії проекту та цілей комунікації; 2) визначення того, яким чином AR-контент буде активовано для користувачів (що буде виступати тригером); 3) визначення того, яким має бути AR-контент (і хто буде його формувати); 4) визначення того, як AR-контент має бути інтегрований у фізичне та соціальне середовище. У [14] викладені такі етапи розробки AR-проекту: 1) вивчення потреб користувачів; 2) визначення цілей проекту; 3) створення контенту; 4) тестування прототипу; 5) оптимізація якості та швидкості демонстрації AR-контенту. У [15] детально описані етапи роботи над AR-проектом в контексті методу Agile: 1) визначення цілей; 2) визначення цільової аудиторії; 3) визначення вимог до проекту з погляду фірмового стилю і так далі. У більшості випадків рекомендовані етапи AR-проекткування є досить загальними і потребують конкретизації для реальних проектів. І перш за все, потрібна підтримка прийняття рішень на різних етапі проектування у вигляді набору можливих альтернатив і їхніх оцінок з погляду різних критеріїв. Зазначений факт визначив мету дослідження.

Метою статті є розробка методики обґрунтування проектних рішень стосовно візуалізації персонажів української міфології із використанням доповненої реальності.

Прикладна проблема: недостатня обізнаність мешканців України та інших країн про українську міфологію.

Наукова проблема: недосконалість методичних основ застосування технології доповненої реальності для вирішення завдань популяризації персонажів української міфології.

Виклад основного матеріалу. Об'єктом цього дослідження є процес прийняття рішень щодо розробки AR-проекту (тобто мультимедійного проекту з використанням доповненої реальності) з візуалізації персонажів української міфології.

Основними складниками зазначеного AR-проекту є:

1) набір цільових зображень, якими є ілюстрації персонажів українських міфів;

2) контент доповненої реальності, який з'являтиметься тоді, коли користувач дивити-

меться на певне цільове зображення крізь камеру смартфона.

Цільовою аудиторією AR-проекту є представники закладів культури, туристи, студенти, учні, викладачі та всі ті, хто цікавиться історією та культурою України.

На основі результатів аналізу процесу застосування технології доповненої реальності [2–6] було сформовано методику обґрунтування проектних рішень щодо візуалізації персонажів української міфології із використанням доповненої реальності. Запропонована методика складається з таких етапів:

Етап 1. Обґрунтування актуальності використання доповненої реальності задля популяризації персонажів української міфології

Робота над мультимедійним проектом має починатися з вибору доцільних засобів передачі заданої інформації. Обґрунтування актуальності використання доповненої реальності задля популяризації персонажів української міфології може бути здійснено шляхом дослідження думок цільової аудиторії із використанням моделі Кано. Модель Кано – це метод визначення пріоритетів на множині функцій та атрибутів продуктів. Згідно з моделлю Кано, функції та атрибути продуктів поділяються на обов'язкові, лінійні, привабливі, не важливі, не бажані. В аспекті проекту, що розглядається, аналізу підлягає AR-функція довільного продукту, призначеного для популяризації персонажів української міфології. Для визначення того, до якого з типів за моделлю Кано належить зазначена функція, респондентам необхідно поставити такі два запитання:

– Запитання 1: «Як ви ставитеся до наявності функції візуалізації AR-контенту в продукті, призначеному для популяризації персонажів української міфології?» Варіанти відповіді: Добре, Очікую, Нейтрально, Можу терпіти, Погано.

– Запитання 2: «Як ви ставитеся до того, що така функція буде виражена слабо або взагалі буде відсутня?» Варіанти відповіді: Добре, Очікую, Нейтрально, Можу терпіти, Погано.

Вказані два запитання були задані студентам Харківського національного економічного університету імені Семена Кузнеця (в опитуванні взяла участь 31 людина). Результати анкетування наведені у табл. 1: згідно з моделлю Кано, перекреслені комірочки таблиці відповідають небажаним функціям; комірочки білого кольору відповідають неважливим, обов'язковим і лінійним функціям, а сірі комірочки – привабливим функціям. Відповідно до результатів проведеного анкетування,

Відповіді респондентів на запитання стосовно їхнього ставлення до наявності функції візуалізації AR-контенту в продукті, призначеному для популяризації персонажів української міфології (за моделлю Кано)

Відповіді на запитання 1	Відповіді на запитання 2 (відсотки від загальної кількості респондентів)				
	Добре	Очікую	Нейтрально	Можу терпіти	Погано
Добре		3%	58%	3%	
Очікую			10%		
Нейтрально		3%	16%	3%	
Можу терпіти			3%		
Погано					

більшість респондентів (64%) оцінюють функцію візуалізації AR-контенту як привабливу функцію для продуктів, призначених для популяризації персонажів української міфології.

Етап 2. Визначення доцільних варіантів носіїв для поширення зображень персонажів української міфології з AR-контентом

Альтернативними варіантами носіїв для поширення зображень персонажів української міфології, призначених для візуалізації контенту доповненої реальності, є:

- A1 – веб-сайти;
- A2 – друковані багатосторінкові видання;
- A3 – плакати та листівки;
- A4 – одяг;
- A5 – настільні ігри;
- A6 – мобільні ігри.

Кожна з альтернатив має свої переваги та недоліки в аспекті популяризації української міфології. Порівняння зазначених альтернатив має здійснюватися за множиною критеріїв, які описують різні вимоги до носіїв цільових зображень.

До множини критеріїв оцінювання альтернатив необхідно віднести такі критерії:

K1 – доцільність використання доповненої реальності спільно з відповідним носієм цільового зображення;

K2 – охоплення аудиторії;

K3 – обсяг інформації, яка може бути подана на носії;

Експертне оцінювання альтернатив за критеріями було здійснено за тривірневою шкалою: 3 – відмінно, 2 – добре, 1 – погано (табл. 2).

Згідно з результатами оцінювання альтернатив за критерієм K1, для реалізації AR-проектів доцільно використовувати носії A2, A3, A4, A5. Серед цих варіантів носіїв найбільше охоплення аудиторії (критерій K2) забезпечують носії A3 (плакати та листівки) та A4 (одяг). Вибір між цими варіантами

носіїв залежить від обсягів інформації, яку планується розмістити на носії. Якщо інформація на цільовому зображенні обмежується ілюстрацією персонажу, підходящими є обидві альтернативи.

Оцінки варіантів носіїв, призначених для поширення зображень персонажів української міфології з AR-контентом, за критеріями K1, K2, K3

Альтернативи	Оцінки за критеріями (за тривірневою шкалою)		
	K1	K2	K3
A1 – веб-сайти	2	3	3
A2 – друковані багатосторінкові видання	3	2	3
A3 – плакати та листівки	3	3	2
A4 – одяг	3	3	1
A5 – настільні ігри	3	1	2
A6 – мобільні ігри	1	2	2

Етап 3. Визначення складників контенту доповненої реальності, призначеного для популяризації персонажів української міфології

Контент доповненої реальності з'являтиметься перед очима користувача тоді, коли цей користувач наведе камеру смартфона на цільове зображення із ілюстрацією міфічного персонажу.

Варіанти складників AR-контенту:

AA1 – анімація зображення персонажу;

AA2 – напис імені персонажу;

AA3 – озвучка імені персонажу;

AA4 – стисле текстове описання персонажу;

AA5 – стисле аудіо описання персонажу;

AA6 – додаткові звукові ефекти;

AA7 – наявність інтерактивності;

AA8 – загальна інформація на тему міфології.

Зазначені альтернативи були запропоновані респондентам (28 осіб) для ранжування. Згідно з результатами

оцінювання, обов'язковим складником AR-контенту має бути анімація зображення персонажу, яка отримала найвищий ранг від респондентів (табл. 3).

Таблиця 3
Результати ранжування варіантів складників AR-контенту, призначеного для популяризації персонажів української міфології

Респонденти	Оцінки альтернатив							
	AA1	AA 2	AA 3	AA 4	AA 5	AA 6	AA 7	AA 8
1	2	3	1	5	8	6	4	7
2	1	2	5	3	6	7	4	8
3	1	2	3	4	6	7	5	8
4	1	3	4	5	6	7	2	8
5	1	2	8	3	7	6	5	4
6	1	4	7	8	6	3	2	5
7	1	4	7	2	8	6	5	3
8	1	3	8	2	7	5	4	6
9	1	2	6	3	8	7	5	4
10	1	2	4	5	3	8	6	7
11	1	6	4	7	5	3	2	8
12	1	7	6	2	3	8	5	4
13	1	3	6	7	4	5	2	8
14	1	2	6	3	7	4	5	8
15	1	8	6	7	5	3	2	4
16	1	6	5	7	4	2	3	8
17	1	7	6	8	5	4	2	3
18	1	2	5	6	4	3	7	8
19	1	4	6	5	7	3	2	8
20	1	2	5	4	6	8	3	7
21	1	2	8	3	7	6	5	4
22	2	6	8	4	7	5	1	3
23	2	1	5	3	6	4	2	7
24	2	1	6	3	8	4	5	7
25	1	3	4	2	6	7	8	5
26	3	1	7	2	8	4	5	6
27	2	1	4	3	6	5	7	8
28	2	7	6	4	3	8	5	1
Сума рангів	36	96	156	120	166	148	113	167
Підсумковий ранг	1	2	6	4	7	5	3	8

Судження респондентів стосовно ранжування варіантів складників AR-контенту були перевірені на узгодженість. Судження можна вважати узгодженими, якщо виконується нерівність:

$$K \cdot m \cdot (n-1) > \chi^{2tab}$$

де K – значення коефіцієнта конкордації Кендала;
 n – кількість альтернатив;

m – кількість експертів;

χ^{2tab} – табличне значення критерію χ^2 Пірсона для кількості ступенів свободи $n-1$.

У нашому прикладі: $n=8, m=28, \chi^{2tab}=14,07$ (для $\alpha=0,05, K = 0,426$).

Звідси: $K \cdot m \cdot (n-1) = 83,5 > \chi^{2tab}$, що підтверджує узгодженість суджень експертів.

Етап 4. Визначення найбільш актуальних персонажів української міфології за допомогою анкетування

Найбільш затребувані міфічні персонажі також мають бути визначені за допомогою анкетування представників цільової аудиторії.

Було проведено анкетування із запитанням типу «мультивибір», у якому респондентів просили відмітити таких міфічних персонажів із заданого набору [16], інформація про які є найбільш цікавою для опитуваних. За результатами опитування найбільш цікавими для респондентів персонажами виявились мавка, відьма, русалка та лісовий дух (рис. 1).

Етап 5. Формування вимог до дизайну цільових зображень та AR-контенту

Вимоги до дизайну цільових зображень AR-проекту визначаються потребою у розпізнаванні цих зображень. Аналіз інформаційних джерел [2-6] дозволив виявити такі основні вимоги до цільових зображень AR-проекту:

- роздільна здатність не менше 300 dpi;
- високий контраст;

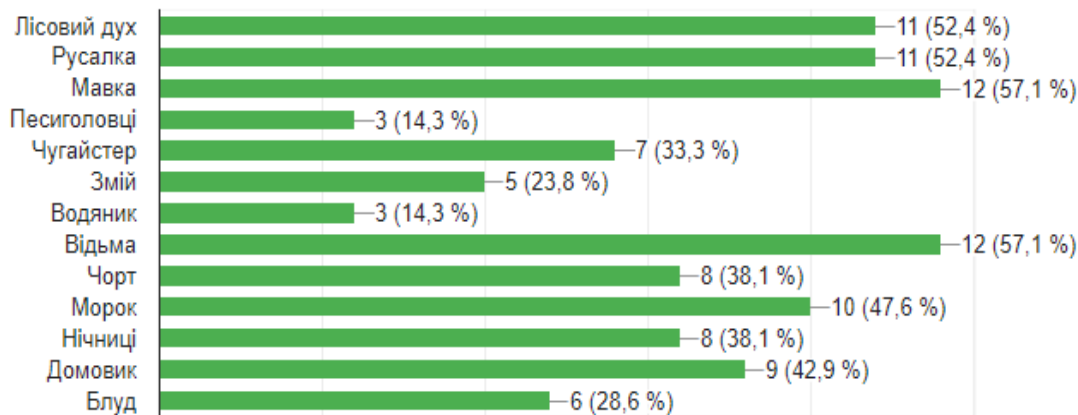


Рис. 1. Результати анкетування щодо виявлення міфічних персонажів, інформація про які є найбільш цікавою для респондентів

- висока чіткість;
- асиметрична композиція.

Вимоги до дизайну AR-контенту визначаються існуючими обмеженнями на розмір файлів AR-проєкту. Так, наприклад, AR-проєкт, створений засобами Meta Spark Studio і призначений для публікації у Facebook та Instagram, повинен мати розмір не більше 2 Мбайт. Існуючі обмеження на розмір файлів з AR-контентом викликають такі вимоги до дизайну контенту доповненої реальності:

- лаконічність, відсутність дрібних деталей;
- доцільність використання прозорих зображень (у цьому випадку основна частина інформації розміщується на цільовому зображенні, а AR-контент містить лише додаткову інформацію).

Етап 6. Визначення змісту AR-контенту за допомогою брейн-шторму

Центральною складовою AR-проєкту є контент доповненої реальності, який, згідно з результатами опитування, має містити анімацію ілюстрації міфічного персонажу. Під час розробки анімації необхідно створити таку динамічну композицію, яка не буде знаходитись у дисонансі з природними почуттями та емоціями глядача. Потрібно поставити себе на місце майбутньої аудиторії та відчути емоції від перегляду ілюстрації. Виходячи з цього, на етапі 6 розробки AR-проєкту рекомендується застосування методів емпатичного аналізу, брейн шторму, а також ментальних карт для візуалізації результатів брейншторму.

Прийняті на основі запропонованої методики проєктні рішення утворюють концептуальну основу для подальшої практичної розробки мультимедійних складових AR-проєкту.

Запропоновану методику використано під час розробки дипломного проєкту Літвінової О. А. з візуалізації персонажів української міфології із застосуванням доповненої реальності на кафедрі комп'ютерних систем і технологій Харківського національного економічного університету імені Семена Кузнеця.

Висновки. У роботі сформовано методику обґрунтування проєктних рішень з візуалізації персонажів української міфології із використанням доповненої реальності. Запропонована методика допомагає прийняти обґрунтовані рішення з вибору: рекламаних міфічних персонажів, носіїв цільових зображень, складників AR-контенту, дизайну графічних і мультимедійних елементів проєкту. У методиці запропоновано використання таких методів інформаційного забезпечення прийняття проєктних рішень, як модель Кано, анкетування, експертне ранжування альтернатив, експертне оцінювання альтернатив за критеріями.

Обмеженням методики є те, що у ній не розглянуті етапи вибору та використання програмного забезпечення, призначеного для розробки доповненої реальності. Цей факт визначає подальші напрями розвитку методики.

Сформована методика може бути легко адаптована під інші завдання популяризації явищ культури з використанням доповненої реальності. Використання методики дозволить підвищити якість розроблюваних AR-проєктів.

В цілому проведене дослідження демонструє важливість та перспективність використання доповненої реальності для візуалізації культурної спадщини та міфологічних образів.

Список літератури:

1. Войтович В. М. Українська міфологія. Київ: Либідь, 2002. 662 с.
2. Artivive. URL: <https://bridge.artivive.com/editor>
3. Eyejack. URL: <https://creator.eyejackapp.com/>
4. Onirix. URL: <https://www.onirix.com/learn-about-ar/the-different-types-of-augmented-reality/>
5. Spark Meta Studio. URL: <https://spark.meta.com/learn/articles/world-effects/best-practice-for-target-tracking>
6. Threekit. URL: <https://www.threekit.com/23-augmented-reality-statistics-you-should-know-in-2023#:~:text=American%20consumers%20are%20beginning%20to,of%20the%20large%20user%20base>
7. Alimamy S., Deans K., Gnoth J. Augmented Reality: Uses and Future Considerations in Marketing. *Leadership, Innovation and Entrepreneurship as Driving Forces of the Global Economy* / R. Benlamri, M. Sparer. Springer, 2017. P. 705–712. https://doi.org/10.1007/978-3-319-43434-6_62
8. Du Z., Liu J., Wang T. Augmented Reality Marketing: A Systematic Literature Review and an Agenda for Future Inquiry. *Frontiers in Psychology*. 2022. № 13, 925963. doi: <https://doi.org/10.3389/fpsyg.2022.925963>
9. Massa E., Ladhari R. Augmented reality in marketing: Conceptualization and systematic review. *International Journal of Consumer Studies*. 2023. n/a-n/a. <https://doi.org/10.1111/ijcs.12930>
10. Parekh P., Patel S., Patel N. et al. Systematic review and meta-analysis of augmented reality in medicine, retail, and games. *Visual Computing for Industry, Biomedicine, and Art*. 2020. № 3, 21 <https://doi.org/10.1186/s42492-020-00057-7>

11. Poushneh A. Augmented reality in retail: a trade-off between user's control of access to personal information and augmentation quality. *Journal of Retailing and Consumer Services*. 2018. № 41. P. 169–176. <https://doi.org/10.1016/j.jretconser.2017.12.010>
12. Siti M. I., Ahmad F. N., Ireen M. I., Siti R. S., Anisah A. R., Siti S. S. Integrating Augmented Reality in Learning Type of Roses. *International Journal of Academic Research in Business and Social Sciences*. 2023. № 13(8). P. 858-867. <https://doi.org/10.6007/IJARBS/v13-i8/18119>
13. Scholz J., Smith A. N. Augmented reality: designing immersive experiences that maximize consumer engagement. *Business Horizons*. 2016. № 59(2). P. 149–161. <https://doi.org/10.1016/j.bushor.2015.10.003>
14. How can you design AR for the best user experience? URL: <https://www.linkedin.com/advice/0/how-can-you-design-ar-best-user-experience-skills-augmented-reality>
15. Sossah M. Agile Augmented Reality Design process: Planning (part 1). URL: <https://www.linkedin.com/pulse/agile-augmented-reality-design-process-flamingofilter>
16. Десять найвідоміших українських міфічних істот. URL: <https://vsviti.com.ua/ukraine/77661>

Potrashkova L.V., Litvinova O.A. JUSTIFICATION OF DESIGN DECISIONS ON VISUALIZATION OF CHARACTERS OF UKRAINIAN MYTHOLOGY USING AUGMENTED REALITY

The article is devoted to the application of augmented reality for the visualization of the characters of Ukrainian mythology. The use of augmented reality (AR) opens a new way to popularize and preserve the images of mythology, which is an important part of the national cultural heritage. But the development of AR projects is a complex process based on a number of design decisions that determine the quality and success of the project. Therefore, an actual scientific task today is the development of theoretical foundations for supporting project solutions in the field of application of augmented reality technology for solving various tasks in the field of cultural and educational activities.

The purpose of this study is to develop a methodology for justification project decisions regarding the visualization of characters from Ukrainian mythology using augmented reality.

In accordance with the given goal, the article has developed a methodology that provides support for decision-making at various stages of AR-project planning in the form of a set of available alternatives and their evaluations from the point of view of various criteria. The methodology helps to make justified project decisions on the selection of: advertised mythical characters, carriers of target images, components of AR content, design of graphic elements of the project (target images and content of augmented reality). The use of the methodology will improve the quality of projects on the popularization of Ukrainian mythology using augmented reality.

To achieve the goal, the following scientific methods were used in the research: analysis and synthesis; survey; Kano model; expert ranking of alternatives and verification of consistency of experts' opinions; expert evaluation of alternatives according to criteria.

In general, the work demonstrates the importance and perspective of using augmented reality for the visualization of cultural heritage and mythological images.

Key words: *multimedia design, augmented reality, Ukrainian mythology, methodology, Kano model, questionnaire, evaluation of alternatives, ranking.*

Пулеко І.В.

Державний університет «Житомирська політехніка»

Побережна М.О.

Державний університет «Житомирська політехніка»

Кравченко С.М.

Державний університет «Житомирська політехніка»

Дмитренко І.А.

Державний університет «Житомирська політехніка»

РІШЕННЯ ЗАДАЧІ КЛАСИФІКАЦІЇ МЕДИЧНИХ ДАНИХ НА ОСНОВІ ПОЄДНАННЯ СЛУЖБИ МАШИННОГО НАВЧАННЯ AZURE ТА РОЗРОБЛЕНОГО ВЕБ-ДОДАТКУ

На даний момент машинне навчання (МН) є одним з найактуальніших напрямків у розробці програмного забезпечення. Особливо широко індустрія охорони здоров'я використовує МН для створення веб-додатків, які спроможні передбачати ризики та виявляти захворювання на ранніх стадіях, з метою поліпшення обслуговування пацієнтів. Описаний у роботі процес розробки такого веб-додатку включає три етапи: створення моделі машинного навчання в Azure, розробку самого веб-додатку та інтеграцію розробленої моделі в нього, а також розгортання веб-сервісу з використанням Azure. Для першого етапу використано Azure Machine Learning Designer, який надає графічне середовище для створення моделей МН. У статті детально описані кроки створення моделі, такі як створення конвеєра, імпорт даних, підготовка даних, навчання моделі з використанням обраного алгоритму, а також оцінка та аналіз отриманої моделі. У розробці використана модель дерева рішень, яка має деревоподібну структуру: внутрішні вузли представляють характеристики даних, гілки відображають правила прийняття рішень, а кінцеві вузли представляють кінцеві результати. Ця модель добре підходить для вирішення задач класифікації, оскільки цільова змінна є дискретною. Після успішного створення та тестування моделі реалізований перехід до наступного етапу – створення веб-додатку з використанням технологій Vue.js, CSS та Node.js. Головна мета цього додатку – надання лікарям можливості швидко діагностувати пацієнтів, а іншим користувачам – доступу до результатів тестів. Для цього створено інтерфейс, який дозволить вводити вхідні дані та отримувати прогнозований результат. Наступним реалізованим етапом є розгортання моделей машинного навчання. Це означає впровадження моделей у виробниче середовище, де вони можуть використовуватися в реальному часі. Після розгортання моделі перевірено її ефективність з використанням тестових даних у форматі JSON, щоб переконатися, що веб-сервіс повертає очікувані результати.

Ключові слова: аналіз даних, модель класифікації, машинне навчання, штучний інтелект, технології програмування, програмне забезпечення.

Постановка проблеми. Сьогодні Інтернет став незамінним у нашому повсякденному житті. Належне використання Інтернету робить наше життя легким, швидким і простим. Інтернет допомагає нам фактами та цифрами, інформацією та знаннями для особистого, соціального та економічного розвитку. У зв'язку з розвитком інтернет-павутини веб-додатки зазнали чимало змін за останні роки. Розробка веб-додатків почала зростати швидше, ніж передбачалося. Потреба користувачів у отриманні розширеного досвіду

та рідкісного контенту з роками багаторазово зросла. Це дозволяє нам зробити висновок, що користувач шукає інтелектуальні та інноваційні веб-додатки, які не тільки надають йому, керований даними, контент, але й дарують йому нестандартні ідеї. Таким чином, є лише одна річ, яка дозволяє задовольнити ці потреби, і це штучний інтелект. Актуальність впровадження штучного інтелекту (ШІ), зокрема машинного навчання (МН) у веб-додаток зростає з кожним роком. Таке рішення не тільки задовольняє потреби

користувачів та покращує кожен сферу життя людства, але й рятує життя. МН широко застосовується в медицині, що допомагає розроблювати нові ліки, оброблювати величезну кількість даних, а найголовніше це діагностувати захворювання на ранніх етапах, що допомагає уникнути летального результату. Впровадження МН у різні додатки дає змогу користувачам краще слідкувати за своїм здоров'ям, а лікарям швидше надавати допомогу пацієнтам.

Подальше дослідження потребує вирішення задачі побудови моделі для аналізу та прогнозування наявності хвороби пацієнта, використовуючи алгоритми класифікації із застосуванням можливостей Machine Learning на хмарній платформі Azure та інтегрування даної моделі у розроблений веб-додаток.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Дослідження з питань штучного інтелекту, зокрема машинного навчання, достатньо активно проводяться у колі науковців та стосуються багатьох сфер життєдіяльності людини. Окремою групою можна розглядати й наукові роботи медичного спрямування, де в основі лежить збір, аналіз та класифікація медичних даних, зокрема із використанням ШІ.

Загальний короткий нарис з поточної теми наведено у тезах авторів Пулеко І.В. та Побережна М.О. [1] У роботі зазначена проблематика, актуальність та наведений загальний план дослідження у рамках даної теми.

У публікації авторів Гадецька З. та Меркотан М. [2] розглядаються актуальні аспекти аналізу та прогнозування рівня захворюваності на COVID-19 у країнах Європейського регіону. Дослідження фокусується на трьох країнах із різним рівнем економічного розвитку: Німеччина, Іспанія та Україна. Для аналізу використовуються статистичні дані з ресурсу Our World in Data, спрямованого на вирішення глобальних проблем. Для прогнозування рівня захворюваності на COVID-19 застосовується модель ARIMA, що відноситься до класу авторегресії інтегрованого ковзкого середнього. Для підбору оптимальних коефіцієнтів ARIMA-моделі використовуються програмні продукти EViews та додаткові засоби, такі як набір надбудов Microsoft Excel, які призначені для проведення економетричного аналізу часових рядів. У даній роботі детально розглядається методологія збору та обробки даних, вибір моделі для прогнозування, а також інструменти, що використовуються для налагодження та аналізу моделі.

Автор Скопівський С.Я. [3] в своїй роботі сконцентрувався на порівнянні ефективності різних керованих алгоритмів машинного навчання для прогнозування захворювань. В рамках дослідження розглядається аналіз різноманітних підходів до прогнозування захворювань COVID-19. Зокрема, автор досліджує використання методів машинного навчання на статистичних даних, що стосуються поширення COVID-19, його взаємодії з іншими захворюваннями. У даній роботі надається детальний огляд різних підходів до прогнозування захворювання та розглядається застосування методів машинного навчання для аналізу статистичних даних. Автор аналізує, як COVID-19 впливає на статистику розповсюдження і взаємодію з іншими захворюваннями.

У статті від автора О.В. Гойка [4] акцентується увага на проблемі наукового аналізу медичних даних, використовуючи передові технології. Подані конкретні рекомендації щодо вибору методу обробки та програмного забезпечення, а також підготовки даних для комп'ютерного аналізу та обробки медичних спостережень. У даній статті звертається увага на проблеми, пов'язані з науковим аналізом медичних даних, і висвітлюється важливість використання сучасних технологій. Надаються конкретні поради щодо вибору оптимальних методів обробки та програмного забезпечення, а також підготовки даних для проведення комп'ютерного аналізу та обробки медичних спостережень.

У своєму дослідженні авторська група в складі Івченко В.К., Івченко А.В., Гальченко В.Я. та ін. [5] здійснила побудову прогностичної моделі, яка базується на аналізі біохімічних досліджень конкретних показників, що стосуються патогенезу ускладнень. В процесі розробки моделі використано метод лінійного непараметричного дискримінантного аналізу, який дозволив об'єднати клінічні показники та метаболічні порушення в єдину математичну модель для передбачення результатів лікування. Для досягнення прогностичних цілей стосовно кожного окремого пацієнта виконується розрахунок трьох функцій, які виконують класифікацію. Розрахунки базуються на центрованих і нормованих значеннях ознак. Пацієнта відносять до певного класу в залежності від того, яка з дискримінантних функцій набуває максимального значення. Створена програма визначає ймовірність або рівень ризику розвитку ускладнень при лікуванні переломів довгих кісток у хворих на цукровий діабет.

У статті від авторів Півошенко В.В., Кулик М.С. та ін. [6] детально розглядається сучасний метод машинного навчання, відомий як навчання з підкріпленням. Основний акцент зроблений на тому, що цей підхід має деякі ключові переваги. Зокрема, автори звертають увагу на можливість розвитку бота «з нуля» завдяки збалансованому поєднанню режимів «дослідження» та «застосування», а також вивченню стратегій, які дозволяють приймати найкращі рішення на основі компромісу між експлорацією та здобутками. У цій роботі автори представляють математичний апарат навчання з підкріпленням, в якому використовується метод безмодельного Q-навчання. Також надається огляд практичних аспектів застосування цього методу і стратегії навчання бота у штучному середовищі.

Метою дослідження є рішення задачі класифікації медичних даних на основі поєднання служби машинного навчання Azure та розробленого веб-додатку. У даній статті буде описана модель класифікації з використанням конструктора машинного навчання Azure. Цей етап буде включати наступні кроки:

- Попередній аналіз даних для знаходження закономірностей між різними функціями;
- Імпорт даних та їх аналіз за допомогою функцій конструктора Azure;
- Підготовка даних для навчання;
- Поділ даних на навчальний і тестувальний набори;
- Розробка та навчання моделі;
- Оцінка якості моделі;
- Розгортання моделі як кінцевого продукту.

Виклад основного матеріалу дослідження

Аналіз вхідних даних

Початкові дані були завантажені із репозиторію машинного навчання Каліфорнійського університету в Ірвіні (UCI Machine Learning Repository). Репозиторій машинного навчання Каліфорнійського університету в Ірвіні є набір баз даних, теорій предметної області та генераторів даних, які використовуються спільноту машинного навчання для емпіричного аналізу алгоритмів машинного навчання.

Репозиторій містить близько 600 наборів даних з різних предметів, включаючи інформатику, науки про життя, фізичні науки, бізнес, соціальні науки, ігри та багато іншого. Ми можемо шукати дані на основі характеристик (наприклад, табличних, часових рядів, послідовних, текстових) або пов'язаних завдань, для яких призначені дані (класифікація, регресія, кластеризація).

Age	Sex	CP	Restbps	Chol	BS	Restecg	MaxHR	Exang	Oldpeak	Slope	CA	Thal	Target	
0	53	1	0	140	203	1	0	155	1	3.1	0	0	3	0
1	70	1	0	145	174	0	1	125	1	2.6	0	0	3	0
2	61	1	0	148	203	0	1	161	0	0.0	2	1	3	0
3	62	0	0	138	294	1	1	106	0	1.9	1	3	2	0
4	58	0	0	100	248	0	0	122	0	1.0	1	0	2	1

Рис. 1. Перегляд набору даних

Для навчання моделі класифікації необхідний набір даних, що включає

Стовпець «Age»: Вік пацієнта.

Стовпець «Sex»: Стать пацієнта (1 – чоловік, 2 – жінка).

Стовпець «ChestPainType»: Тип болю в грудях (1 – типова стенокардія, 2 – атипова стенокардія, 3 – неангінозний біль, 4 – симптоми відсутні).

Стовпець «RestingBlood»: Артеріальний тиск у стані спокою.

Стовпець «Chol»: Показник холестерину.

Стовпець «BloodSugar»: Цукор в крові натще > 120 мг/дл (1 – істинно, 0 – хибно).

Стовпець «Electrocardiographic»: Результати електрокардіографії в стані спокою (0 – нормальне, 1 – має аномалії хвили ST-T, 2 – показ імовірної або певної гіпертрофії лівого шлуночка за критеріями Естеса).

Стовпець «MaxHeartRate»: Досягнутий максимальний пульс.

Стовпець «ExerciseAngina»: Стенокардія, спричинена фізичними вправами (1 – так, 0 – ні).

Стовпець «Oldpeak»: Депресія ST, спричинена фізичними вправами відносно відпочинку.

Стовпець «Slope»: Нахил піку вправи сегмента ST (1 – підвищення, 2 – плоский, 3 – спад).

Стовпець «NumOfMajorVessels»: Кількість основних судин (0–3), пофарбованих флюороскопією.

Стовпець «Thal»: Результати сканування товщини серця (3 – нормальний, 6 – виправлений дефект, 7 – оборотний дефект).

Стовпець «Target»: Результат діагностики серцевих захворювань (0 – відсутнє, 1 – наявне).

Для початку проаналізуємо загальні характеристики в наборі даних. Для початку розглянемо тип кожної змінної.

#	Column	Non-Null Count	Dtype
0	Age	1024 non-null	int64
1	Sex	1024 non-null	int64
2	CP	1024 non-null	int64
3	Restbps	1024 non-null	int64
4	Chol	1024 non-null	int64
5	BS	1024 non-null	int64
6	Restecg	1024 non-null	int64
7	MaxHR	1024 non-null	int64
8	Exang	1024 non-null	int64
9	Oldpeak	1024 non-null	float64
10	Slope	1024 non-null	int64
11	CA	1024 non-null	int64
12	Thal	1024 non-null	int64
13	Target	1024 non-null	int64

dtypes: float64(1), int64(13)
memory usage: 112.1 KB

Рис. 2. Перегляд типу кожного значення

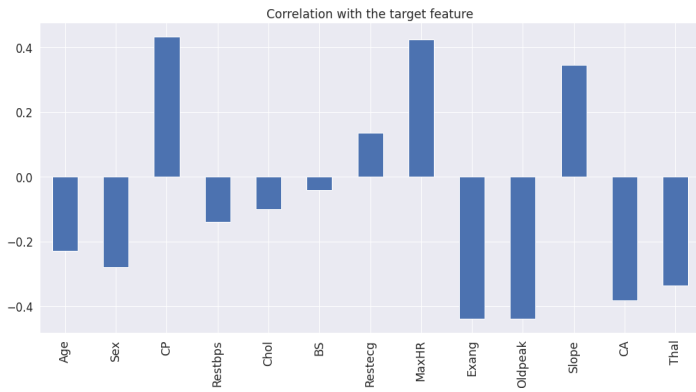


Рис. 3. Результат кореляції цільової змінної

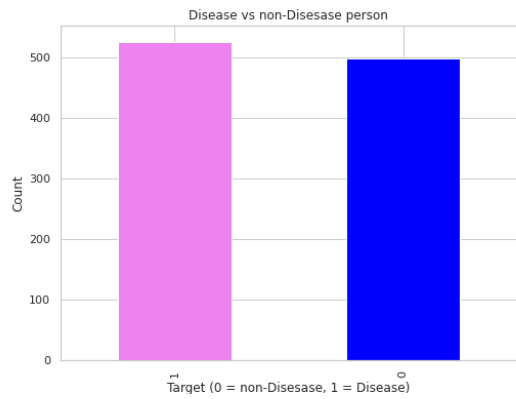


Рис. 4. Кількість здорових і хворих людей

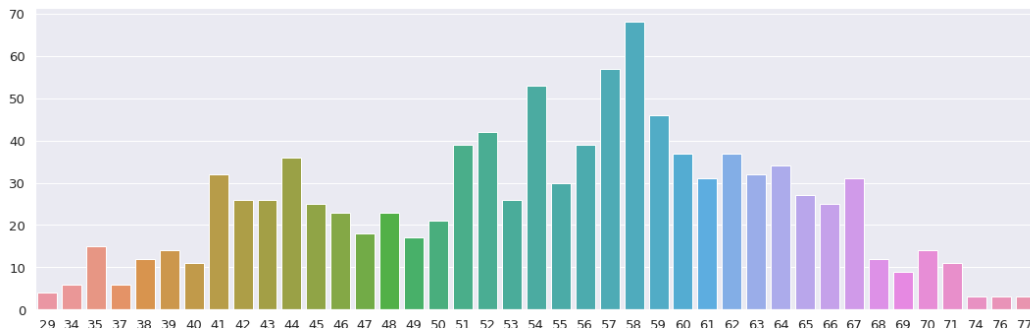


Рис. 5. Кількість пацієнтів в різному віці

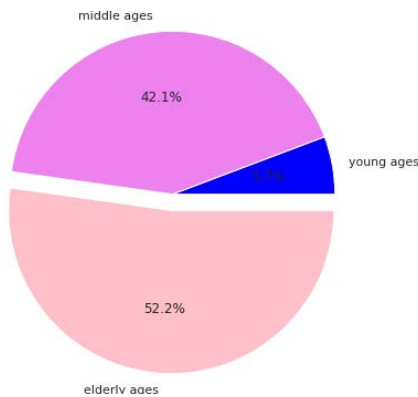


Рис. 6. Різні вікові категорії

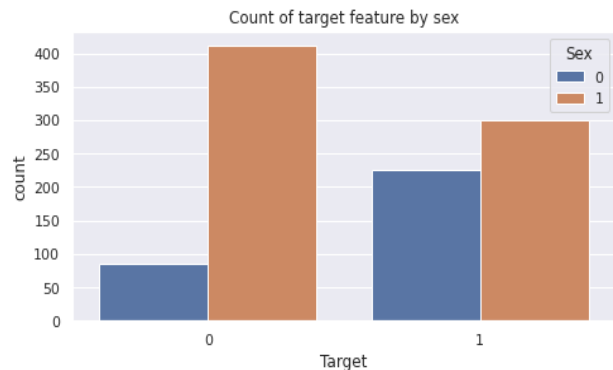


Рис. 7. Порівняння хворих за статтю

Наші дані не мають нульових значень і це хороший показник для майбутніх досліджень.

За допомогою методу `df.describe()` ми можемо побачити опис кожного стовпця, а саме кількість непорожніх значень, середнє значення, стандартне відхилення, кuartили та максимальні значення.

Далі перевіримо зв'язок кожної змінної за допомогою кореляції цільової змінної.

Чотири ознаки («CP», «Restbpps», «MaxHR», «Slope») позитивно корелюють з цільовою ознакою.

Побудуємо діаграму, де зможемо побачити кількість хворих та здорових людей.

Далі проведемо аналіз окремих змінних.

Дана діаграма показує, що найбільше кількість пацієнтів, яким 58 років.

Тепер поділимо наш вік на різні категорії.

Тут ми бачимо, що люди похилого віку найбільше страждають від хвороб серця, а молодь – найменше.

Проведемо багатофакторний аналіз, порівнявши кількість здорових і не здорових людей за статтю.

Звідси випливає, що найбільше хворіють саме чоловіки.

Наступний графік показує залежність віку і значення максимального тиску пацієнта, а також чи хворий пацієнт з таким співвідношенням.



Рис. 8. Співвідношення віку та максимального тиску

Більшість пацієнтів, які мають високий тиск, виявлено серцево-судинну хворобу, незалежно від віку.

Розробка та навчання моделі для класифікації

Проаналізувавши вхідні дані, перейдемо до моделі прогнозування міток, базуючись на вхідних даних. В першу чергу ми імпортуємо наші дані в конструктор машинного навчання Azure. Далі потрібно провести певні перетворення даних для поліпшення навчання моделі. Наші дані мають достатньо категоріальних стовпців, тому використовуючи модель Edit Metadata (Редагування метаданих) позначимо ці стовпці.

Далі ці стовпці перетворимо у ряд бінарних індикаторів. Для цього використовуємо модуль Convert to Indicator Values (Перетворення на значення індикаторів). На виході наші дані будуть мати наступний вигляд (рис. 10).

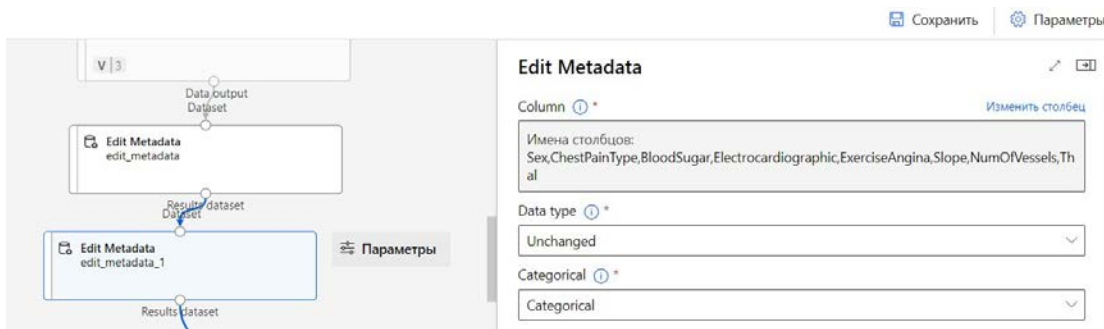


Рис. 9. Співвідношення віку та максимального тиску

t	Sex-0	Sex-1	ChestPainType-0	ChestPainType-1	ChestPainType-2	ChestPainType-3	E
0	1	0	1	0	0	0	1
0	1	0	1	0	0	0	1
0	1	0	1	0	0	0	1
0	1	0	1	0	0	0	1
1	0	1	0	0	0	0	1
1	0	1	0	0	0	0	1
0	1	0	1	0	0	0	1
0	1	0	1	0	0	0	1
0	1	0	1	0	0	0	1
0	1	0	1	0	0	0	1
1	0	1	0	0	0	0	1
1	0	1	0	0	0	0	1
1	0	0	1	1	0	0	1

Рис. 10. Перетворення стовпців

Тепер на прикладі стовпця «Sex» ми бачимо, що кожна стаття це окремий стовпець. Надалі буде легше оцінити важливість кожного значення.

Останній крок перед навчанням це поділ наших даних на навчальні та тестові набори даних, щоб оцінити, чи правильно працює модель машинного навчання. Для поля модуля «Частка рядків у першому вихідному наборі даних» задаємо значення 0.75, що означає поділ даних у співвідношенні 80 на 20. Тобто 20 відсотків піде на тестування нашої моделі. Також важливо поставити значення «true» для поля «Випадковий поділ». Це бажаний варіант, коли ви створюєте навчальні та тестові набори даних.

Далі підключаємо наш алгоритм, а саме модуль «Two-Class Boosted Decision Tree component» (Посилене дерево рішень). Цей модуль не просто будує дерева рішень, і обирає краще, але й виправляє помилки попередніх дерев. Прогнози ґрунтуються на сукупності всіх дерев, які складають прогноз.

Також важливо налаштувати параметри навчання. Для кращого прогнозу буде використано модуль «Tune Model Hyperparameters» (Налаштування гіперпараметрів моделі). Для кращого розуміння, розберемось з такими поняттями:

Параметри моделі – це параметри в моделі, які необхідно визначити за допомогою набору навчальних даних. Це встановлені параметри. Наприклад: кількість точок поділу в дереві рішень тощо.

Гіперпараметри – це налаштовувані параметри, які дозволяють контролювати процес навчання моделі. Наприклад, у випадку нейрон-

них мереж ви встановлюєте кількість прихованих шарів та число вузлів у кожному з них. Ефективність моделі визначається гіперпараметрами.

Налаштування гіперпараметрів – це процес пошуку конфігурації гіперпараметрів, що забезпечує найкращу продуктивність. Цей процес потребує значних обчислювальних ресурсів та вимагає виконання великого обсягу ручної роботи. Це досягається шляхом навчання кількох моделей з використанням одного і того ж алгоритму та даних навчання, але з різними значеннями гіперпараметрів. Результуюча модель кожного тренувального прогону потім оцінюється, щоб визначити показник продуктивності, для якого потрібно оптимізувати (наприклад, точність), і вибирається найбільш продуктивна модель.

Також до нашої моделі додаємо модуль «Permutation Feature Importance» (Важливість функції перестановки). Даний модуль допоможе оцінити важливість кожної функції методом перестановки.

Після навчання моделі важливо оцінити її продуктивність. Існує безліч показників продуктивності та методології для оцінки того, наскільки добре модель робить прогнози. Для цього підключаємо модуль «Score Model» та «Evaluate Model». Перший модель показує прогнозовану мітку для кожного рядка тестових даних, в той час як другий допомагає оцінити якість моделі за допомогою метрик, які розглянемо в наступному розділі.

Наша сконструйована модель виглядає наступним чином (рис. 11).

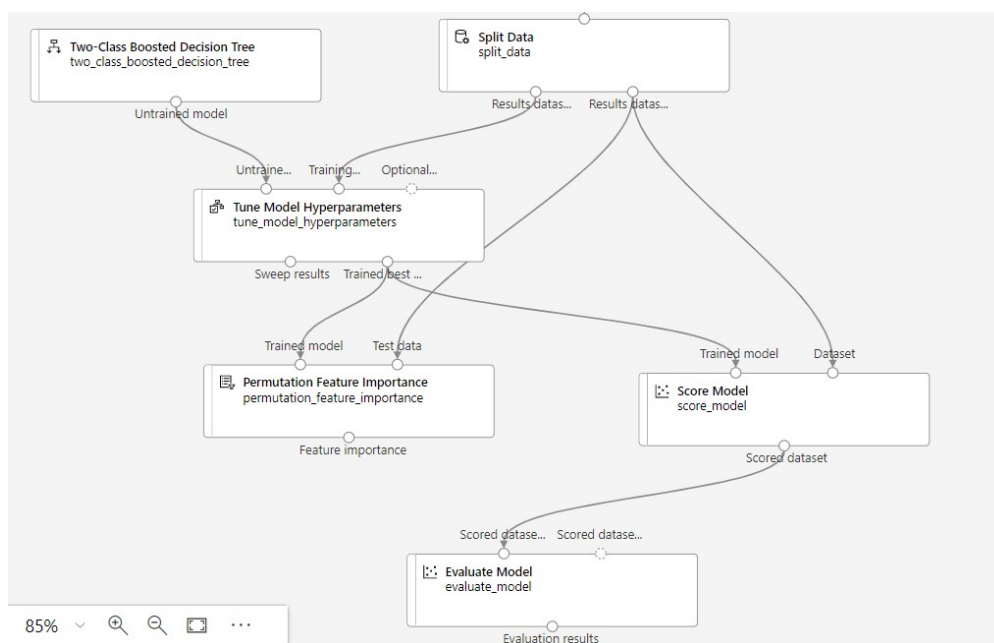


Рис. 11. Сконструйована модель

Оцінка та аналіз якості моделі

Розробка моделі зазвичай поділяється на три етапи. Спочатку модель навчається на навчальному наборі даних, що підходить для даної задачі. По-друге, під час навчання модель постійно перевіряється на даних, які є частиною навчальних даних, щоб оцінити продуктивність моделі на невидимих даних. Нарешті після того, як модель закінчила навчання, вона тестується на тестовому наборі даних, для якого повинні бути розраховані остаточні метрики. Незалежно від того, яка метрика використовується, вона може бути такою ж інформативною, як і продуктивність класифікатора на тестових даних.

Існує чимало показників з метою оцінки моделей машинного навчання у різних додатках. Більшість їх можна розділити на дві категорії залежно від типів прогнозів у моделях машинного навчання.

Ось деякі з популярних метрик класифікації, які ми збираємося розглянути:

- Акуратність;
- Точність;
- Повнота;
- Оцінка F1.

Матриця плутанини представляє собою ключовий елемент, що використовується для оцінки продуктивності моделі класифікації у машинному навчанні, хоча сама по собі не є метрикою. Сутність полягає у створенні двовимірної таблиці, що відображає фактичні та передбачені значення. В даному випадку виникає потреба розробити класифікатор, який здатен визначати пацієнтів на хворих і здорових.

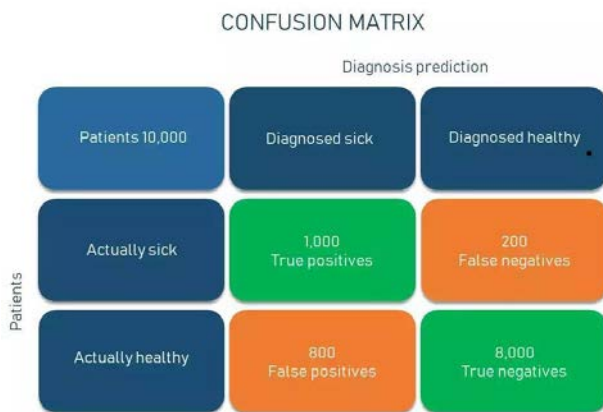


Рис. 12. Схема матриці плутанини

Істинно-позитивно (TP) – клас спрогнозовано вірно і вірно в дійсності (пацієнти, які хворі і хворіють діагнозом);

Істинно-негативно (TN) – клас спрогнозовано хибно і хибно в дійсності (пацієнти, які здорові і діагностовані здоровими);

Хибно-позитивні (FP) – клас спрогнозовано як істинний, але в дійсності хибний (пацієнти, які здорові, але діагностовані як хворі); і

Хибно-негативні (FN) – клас спрогнозовано як хибні, але насправді правдивий (пацієнти, які хворі, але діагностовані здоровими).

Розібравшись з деталями схеми, переглянемо нашу отриману матрицю плутанини (рис. 13).

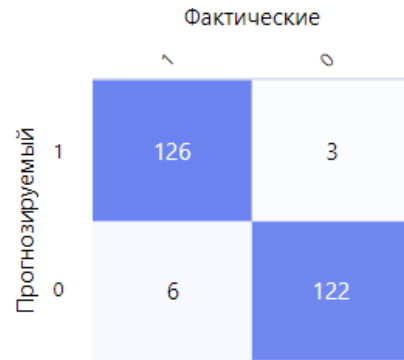


Рис. 13. Матриці плутанини

По даній матриці видно, що майже усі тестові дані спрогнозовано вірно. Акуратність використовується до розрахунку частки правильних прогнозів від загального числа. Це кількість правильних прогнозів, поділена на загальну кількість прогнозів.

Формула виглядає наступним чином:

$$Accuracy = \frac{TP + TN}{TP + TN + FP + FN} \quad (1)$$

Будучи одним із найпоширеніших показників класифікації, точність дуже інтуїтивно зрозуміла і проста для розуміння та реалізації: вона варіюється від 0 до 100 відсотків або від 0 до 1. Якщо ми візьмемо модель діагнозу «здоровий/хворий», з усіх 10 000 пацієнтів модель правильно класифікує 9 000 пацієнтів, або 90 відсотків, або 0,9, якщо ми вимірюємо від 0 до 1. Отже, наш показник акуратності дорівнює 0.99.

Точність показує, яка частка із усіх позитивних прогнозів була правильною. Щоб розрахувати його, ви ділите кількість правильних позитивних результатів (TP) на загальну кількість всіх позитивних результатів (TP + FP), передбачених класифікатором.

Формула виглядає наступним чином:

$$Precision = \frac{TP}{TP + FP} \quad (2)$$

Повнота показує частку правильних позитивних прогнозів від усіх позитивних результатів, які б зробила модель. Щоб обчислити його, ви ділите всі справжні позитивні результати у сумі всіх справжніх позитивних і хибних негативних результатів у наборі даних. Таким чином, повнота

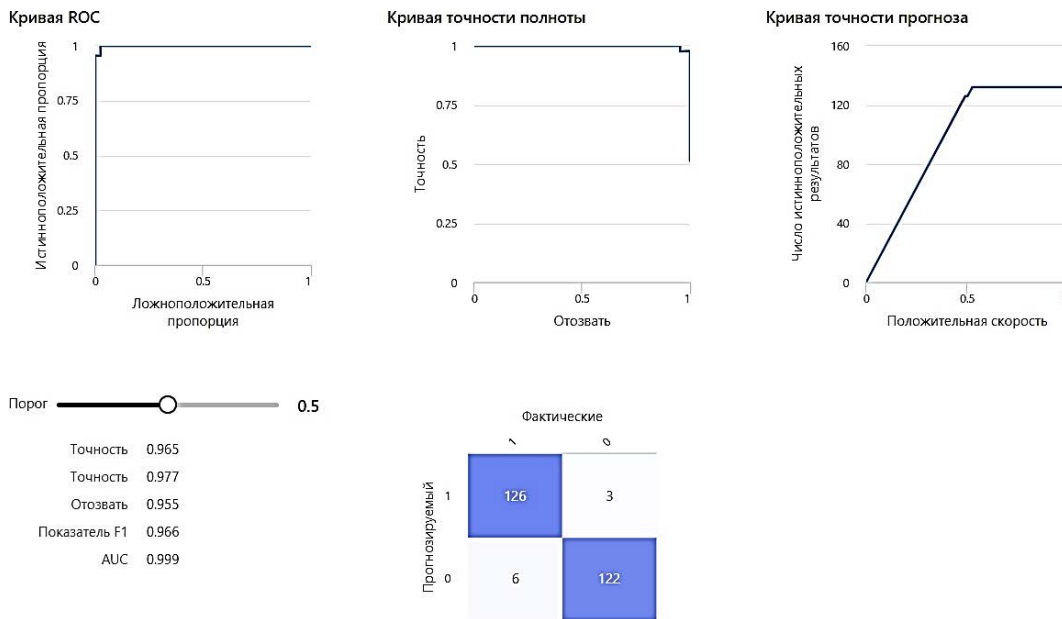


Рис. 14. Метрики навченої моделі

вказує на пропущені позитивні прогнози на відміну від метрики точності, яку ми пояснили вище.

Формула виглядає наступним чином:

$$Recall = \frac{TP}{TP + FN} \quad (3)$$

Оцінка F1 намагається знайти баланс між точністю та повноти, обчислюючи їхнє середнє гармонійне. Це міра точності тесту, де максимально можливе значення дорівнює 1. Це вказує на ідеальну точність та повноту.

Формула виглядає наступним чином:

$$F_1 = \left(\frac{recall^{-1} + precision^{-1}}{2} \right)^{-1} = 2 \cdot \frac{precision \cdot recall}{precision + recall} \quad (4)$$

Усі метрики нашої моделі можемо переглянути на рисунку 14.

Дослідимо ще одну з найбільш важливих метрик для перевірки якості моделі класифікації, на яку ми будемо найбільше опиратись – AUC-ROC крива (рис. 14).

Крива AUC-ROC є вимірюванням продуктивності для завдань класифікації при різних порогових значеннях. ROC являє собою криву ймовірності, а AUC є ступенем або мірою роздільності. Він каже, наскільки модель здатна розрізняти класи. Чим вище AUC, тим краще модель перед-

бачає 0 класів як 0 і 1 клас як 1. За аналогією, чим вище AUC, тим краще модель розрізняє пацієнтів із захворюванням і без захворювання.

Проаналізувавши кожну метрику і отримавши хорошу оцінку AUC, можна впевнено сказати, що наша модель має гарні результати та готова до тесту у режимі реального часу.

Висновки. У статті було вирішена актуальна задача класифікації медичних даних на основі конструктора машинного навчання Azure. Був обраний метод контрольованого машинного навчання, а саме метод класифікації, для вирішення поставленої задачі. Для вирішення проблеми прогнозування серцевих захворювань було обрано хмарну платформу Microsoft Azure з сервісом Azure Machine Learning. Розроблена модель прогнозування серцевих захворювань включає модулі: набір даних, два модулі редагування даних, вибір стовпців для навчання, виконання R скрипта, поділ даних, двокласове збільшене дерево прийняття рішень, налаштування гіперпараметрів моделі, навчання моделі, оцінка та аналіз моделі. Наступним етапом було оцінювання якості моделі за допомогою метрик: акуратність, точність, повнота, оцінка F1 та AUC-ROC крива.

Список літератури:

1. Puleko I.V., Poberezhna M.O. Solution of the Classification Problem for Medical Data on the Basis of Azure Machine Learning Service and the Developed Web Application. *Тези доповідей IV Всеукраїнської науково-технічної конференції: «Комп'ютерні технології: інновації, проблеми, рішення*, 18-20 листопада 2021 року. Житомир: «Житомирська політехніка, 2021. С. 13-14.

2. Гадецька З., Меркотан М. Аналіз і прогнозування рівня захворюваності на Covid-19 в країнах європейського регіону. *Економіка та суспільство*. 2022. Вип. 39. <https://doi.org/10.32782/2524-0072/2022-39-20>.

3. Скопівський С.Я. Аналіз методів прогнозування інфекційних захворювань. *Вісник Хмельницького національного університету*. 2022. Вип. 4 (311). С. 237-240.

4. Гойко О.В. Сучасні технології обробки й аналізу медичних даних. *Медична інформатика та інженерія*. 2009. Вип. 4. С. 39-44.

5. Івченко В.К., Івченко А.В., Гальченко В.Я., Івченко Д.В., Швець О.І. Прогнозування результатів лікування переломів довгих кісток у хворих на цукровий діабет засобами інтелектуального та статистичного аналізу даних. *Журнал «Травма»*. 2013. Том 14, № 4. URL: <http://www.mif-ua.com/archive/article/3680>

6. Півошенко В.В., Кулик М.С., Іванов Ю.Ю., Васюра А.С. Аналіз та експериментальне дослідження методу безмодельного навчання з підкріпленням. *Вісник Вінницького політехнічного інституту*. 2019. Вип. 3. С. 40-49.

Puleko I.V., Poberezhna M.O., Kravchenko S.M., Dmytrenko I.A. SOLUTION OF THE CLASSIFICATION PROBLEM FOR MEDICAL DATA ON THE BASIS OF AZURE MACHINE LEARNING SERVICE AND THE DEVELOPED WEB APPLICATION

At the moment, machine learning (ML) is one of the most relevant directions in software development. The healthcare industry is especially widely using ML to create web applications that are able to predict risks and detect diseases in the early stages, in order to improve patient care. The process of developing such a web application described in the work includes three stages: creating a machine learning model in Azure, developing the web application itself and integrating the developed model into it, as well as deploying the web service using Azure. For the first stage, Azure Machine Learning Designer was used, which provides a graphical environment for creating ML models. The article describes in detail the steps of creating a model, such as creating a pipeline, importing data, preparing data, training the model using the chosen algorithm, as well as evaluating and analyzing the resulting model. The development uses a decision tree model, which has a tree-like structure: internal nodes represent data characteristics, branches reflect decision-making rules, and end nodes represent final results. This model is well suited for solving classification problems because the target variable is discrete. After the successful creation and testing of the model, the transition to the next stage was implemented - the creation of a web application using Vue.js, CSS and Node.js technologies. The main purpose of this application is to enable doctors to quickly diagnose patients and other users to access test results. For this, an interface has been created that will allow you to enter input data and receive a predicted result. The next implemented stage is the deployment of machine learning models. This means bringing the models into a production environment where they can be used in real time. After the model was deployed, its performance was tested using test data in JSON format to ensure that the web service returned the expected results.

Key words: data analysis, classification model, machine learning, artificial intelligence, programming technologies, software.

Редько І.В.

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

Яганов П.О.

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

Зилевіч М.О.

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

КОНЦЕПТОЛОГІЧНІ ЗАСАДИ ТЕХНОЛОГІЧНИХ СИСТЕМ ПРОГРАМУВАННЯ

У статті досліджена і обґрунтована необхідність парадигмальних змін у технологічних основах програмування, переходу від індивідуально-суб'єктивної парадигми програмування до інтерсуб'єктивної, основу якої складає евідентне основоположення про цілісне розуміння програмування, як діяльності, що обумовлена програмою. Розвиток цієї парадигми, зокрема і технологічного середовища програмування як платформи програмної релятивізації, є покроковим продуктивним збагаченням основоположення про цілісне розуміння. Програмування розглянуто у контексті осучаснення його розуміння як діяльності, що обумовлена програмним уподібненням, суб'єктоорієнтованим взаємодоповненням його активної та пасивної форм. Об'єктивізація активно-пасивного взаємодоповнення є основною передумовою реального осучаснення розуміння програмування як рефлексивно-транзитивного замикання породжуваного суб'єктом програмного уподібнення. Визначальною для об'єктивізації активної ролі суб'єкта в контексті побудов у середовищі програмування є концепт – суть – уподібнення згаданого носія, представлена у вигляді тієї чи іншої специфікації. Інструмент логіко-математичних специфікацій семантико-синтаксичних аспектів програмування апробовано на прикладах, продемонстровано загальні особливості застосування технологічного середовища програмування до породження суб'єктоорієнтованих технологічних систем програмування та їх використання. Розглянуті приклади вирішення задач у арифметичній системі програмування демонструють важливі загальні особливості редуційного концептування оракульних схем. Це, по-перше, гарантована коректність отримуваних рішень, що впливає безпосередньо з їх побудови. По-друге, можливість переходу від рішень окремих задач до вирішення класів подібних задач. І, по-третє, отримані рішення можуть бути реалізовані на різних синтаксичних програмних платформах.

Ключові слова: концепт, монада, композит, композиція, редуція, оракульні схеми, середовище програмування.

Постановка проблеми. Відомо, що свідоме розв'язання будь-якої задачі полягає в наявності конкретного плану, виконання якого спрямоване на досягнення поставленої мети. Нині цей план, очевидно чи інтуїтивно, пов'язаний з розумінням розв'язку основної задачі через інтеграцію рішень її підзадач. Методи отримання та формалізація таких рішень залежать від конкретної сфери, складності задачі, наявних ресурсів для виконання, рівня професійної підготовки виконавця, особистих уявлень про ефективність методів і засобів тощо. Це значно впливає на якість отримуваних результатів, ступінь обґрунтованості та достовірність, ефективність формалізації таких

рішень та можливості їх подальшого використання, наприклад, як компоненти для розв'язання нових задач.

До тепер ця концепція «розділай та володарюй» у програмуванні призводила до вражаючих результатів, що очевидно вказували на її переваги, не звертаючи увагу на серйозні труднощі, які супроводжували та супроводжують цей підхід і розглядаються як об'єктивні проблеми розвитку. До певного моменту такий підхід не тільки не завдавав шкоди, а навіть сприяв розвитку програмування, забезпечуючи розширення бази фактів у програмуванні як основи для подальших досліджень. Як приклад, можна згадати відому

енциклопедичну монографію Д. Кнута під назвою «Мистецтво програмування» [1].

Але, як завжди, часом те, що раніше можна було вважати другорядним, стає ключовим аспектом. Програма як продукт повинна ґрунтуватися на технологічних принципах обробки інформації та пов'язаних з ним процесів. З іншого боку, її реалізація залишається великою мірою особистісною, і вона оцінюється лише за кінцевим результатом і не може бути відокремленою від виконавця. Такий підхід надає максимальну свободу для креативності у програмуванні, розглядаючи його перш за все як мистецтво, з усіма властивими цьому підходу перевагами та недоліками. Переваги цього підходу відомі всім, але його головним недоліком є занадто спрощене розуміння програмування, яке не відповідає сучасним вимогам. Це проявляється у фокусуванні на результаті творчого процесу – самій програмі, і у відсутності адекватної уваги до самого процесу. Як наслідок, не відокремленість програми від суб'єкта програмування ускладнює можливість дослідження продуктивних принципів програмування. Оскільки фундаментальні властивості програм формуються під час їх створення, така надмірна спрощеність у розумінні програмування стає серйозним обмеженням для розвитку сучасних технологічних основ програмування. Тому важливим є удосконалення розуміння програмування.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. У роботах [2–4] було доведено, що розв'язання цієї проблеми вимагає суттєвих змін – переходу від індивідуально-суб'єктивного підходу до інтерсуб'єктивного підходу у програмуванні, який активно враховує роль суб'єкта у процесі програмування та сприяє його продуктивній технологізації. Цей перехід ґрунтується на концепції суттєвого уподібнення (ССУ), що є особливими відносинами, що виникають при розгляді причинно-наслідкового зв'язку між процесом вирішення задачі та його результатом [2, 3]. Точно через цю концепцію виникає програмна релятивізація (ПР), що є суттєвостісною релятивізацією у програмуванні, спрямованою на його технологізацію, і ця тема є основною у даному дослідженні.

У роботах [3, 4] показано, що платформа для вивчення суттєвих уподібнень і програмної релятивізації є біабстрактною, тобто вона забезпечує взаємодію двох різних типів абстракцій, які об'єктивно не пов'язані один з одним: закритої інтерсуб'єктивної логіки, що є ядром технологічного середовища програмування (ТСрП), та відкритого різноманіття суб'єктоорієнтованих роз-

ширень – технологічних систем програмування (ТСП). Тому саме взаємодія між цими двома аспектами вибрана як об'єкт дослідження. Взаємодія між ними підтримується за допомогою суттєвих уподібнень, які спрямовані на врахування активної ролі суб'єкта програмування. Об'єктивізація суб'єкта через актуалізацію інтерсуб'єктивних модальностей, які є характерними для ТСрП, як метод програмної релятивізації, його розвиток і застосування – це ціль даної роботи.

Метою статті є обґрунтування необхідності парадигмальних змін у технологічних основах програмування, переходу від індивідуально-суб'єктивної парадигми програмування до інтерсуб'єктивної, а також представлення технологічної системи програмування як платформи для сучасного редуційного програмування і її використання в розв'язанні типових задач.

Виклад основного матеріалу дослідження. З вищезазначеного стає зрозумілим, що досягнення нашої мети можливе через збагачення терміна «система програмування» більш глибоким інтелектуальним вмістом, в якому логіка та предметна суть об'єднуються у спільному контексті ТСрП та ТСП – це важлива реалізація цього розуміння.

Основа інтерсуб'єктивної парадигми полягає в твердженні, що програмування повинно бути розглянуте як діяльність, що визначається програмою. Розвиток цієї парадигми, включаючи створення ТСрП як платформи для програмної релятивізації, є етапним процесом поступового збагачення цієї основної ідеї. Ця розбудова відповідає тренду «від цілісного уявлення до продуктивного розуміння» програмування. Тут продуктивність означає спрямованість на технологізацію. Давайте коротко розглянемо основні кроки цього процесу.

З цього основного положення випливає, що для продуктивного збагачення нашого загального розуміння програмування, спочатку необхідно розширити наше розуміння того, що таке програма. Це означає, що збагачення має бути фундаментальним, як, наприклад, у відповідності до принципу достатніх підстав, який був сформульований Лейбніцем [5]. Трактуючи термін «програма» як уподібнення суттєвої риси [2, 3] виглядає найбільш відповідним у цьому контексті. Ця ідея допомагає нам розуміти програмування як взаємодоповнення двох об'єктивно незалежних типів абстракцій – сутності, яка визначає «що може бути», та суті, яка визначає «що є». Таким чином, ми отримуємо продуктивне розширення початкового основоположення: програмування –

це діяльність, яка визначається програмним уподібненням (ПУ). У цьому контексті ПУ – це продуктивне збагачення суттєвого уподібнення.

Наступним кроком у створенні ТСрП є безумовне збагачення програмного уподібнення. Головною особливістю останнього є його неможливість об'єктивно зведення модальності сутності, яка визначає «що може бути», та реальності суті, яка визначає «що є». Це призводить до біабстрактності ТСрП як носія програмних уподібнень.

Кожне конкретне програмне уподібнення виникає на основі обумовлення сутності – зв'язування її певною умовою. З цього очевидно, що носієм таких умов може бути лише суб'єкт, який обумовлює їх як інструмент об'єктивізації, а уподібнення представляє собою реалізацію взаємодоповнення активного та пасивного обумовлення [3]. Тому об'єктивізація активно-пасивного взаємодоповнення є необхідною передумовою для справжнього оновлення розуміння програмування як рефлексивно-транзитивного зв'язку, що створюється суб'єктом завдяки програмному уподібненню. Ключовою для об'єктивізації активної ролі суб'єкта в контексті побудови ТСрП є концепція – сутність – уподібнення цього носія, яка представлена в формі специфікації. А уподібнення, як ціле (єдине, монадне) наслідок уподібнення, об'єктивізує пасивну частину обумовлення. Таким чином, ми приходимо до наступного етапу розширення програмного (суттєвого) уподібнення:

$$\begin{cases} \text{концепт} = \text{суть, що обумовлює сутність} \\ \text{програма} = \text{сутність, що обумовлюється концептом} \end{cases}$$

Концепт забезпечує узгодженість у побудові, а програма – їх ефективність. Перехід між ними реалізується через програмне уподібнення. Важливо відмітити, що концепт, програма і обумовлення, що використовуються тут, вводяться в інтенціональному аспекті – не з точки зору їх конкретних об'ємів, а як абстракції від відповідних суб'єктних умов, які можна розглядати як оракули [2, 4]. Отже, дана концептуальна визначеність представляє собою відкриту систему, яка включає як внутрішні, так і зовнішні аспекти програмування [2, 4]. Враховуючи реальність її створення, ця визначеність є цілісною. Таким чином, вона потребує подальшого розширення для забезпечення ефективності.

Розгляд оракулів, як відкритих систем, приводить до вивчення оракулів більш високого рівня – оракульних схем, які можуть значно підвищити продуктивність побудов. Особливе місце

серед них займають композитні схеми, які мають загальне значення та є базовими [2]. Дослідження в галузі композитного програмування (див., наприклад, у [4, 7–13] і посилання на них) переконливо доводять, що таке розширення концептопрограмної парадигми є дуже продуктивним. Тобто, ТСрП, як втілення всебічного розуміння програмування, в остаточному підсумку, може бути побудовано шляхом композитно-композитного розширення базової концептопрограмної визначеності. Таким чином, всі подальші розширення будуть спрямовані на підвищення ефективності і пов'язані з індивідуальними зв'язками ТСрП з відповідними ТСП.

З усього вищезазначеного можна зрозуміти, що будь-яка ТСП виникає через процес програмного уподібнення, який представляє собою послідовне замикання концептопрограмної системи ТСрП відкритого-замкненого композитологічного оракульного середовища. Цей процес полягає в актуалізації відповідних оракулів ТСрП.

Отже, концептопрограмне замикання є основою методу програмної релятивізації, який використовується для специфікації ТСП. Результатом цього процесу є створення суб'єктоорієнтованої системи, яка імплементує активну роль суб'єкта у програмуванні. Цей процес включає кілька етапів:

1. Уточнення базових та похідних генетичних структур як концептів, які властиві як суб'єкту, так і об'єкту програмування.

2. Визначення базових предметних операцій, які не потребують додаткової деталізації з прагматичних причин.

3. Створення композито-композиційних інтерфейсів для взаємодії з ТСП.

Цей процес може бути проілюстрований на прикладах програмування арифметичних перетворень, які демонструють загальні особливості використання ТСрП для створення ТСП та їх використання, зокрема, гарантовану коректність отримуваних рішень, можливість застосування їх для вирішення подібних задач та можливість реалізації отриманих рішень на різних синтаксичних програмних платформах.

Таким чином, носій \mathcal{E} арифметичної ППА складають n -арні частково-рекурсивні арифметичні функції виду $N^n \rightarrow N$ та n -арні частково-рекурсивні арифметичні предикати виду $N^n \rightarrow \{T, F\}$, $n \in N$ (далі – функції та предикати) [15]. Сигнатуру ж ППА (позначатимемо тут Ω) складають операції суперпозиції, розгалуження і циклування, що є адекватними уточненнями основних методів конструювання програм [8–12].

Нагадаємо формальні визначення цих операцій, деякі позначення та результати. Зауважимо, що при акцентуванні уваги на генетичних особливостях розглядуваних функцій та предикатів у їх позначенні перевага надаватиметься операторній, а при акцентуванні на результатах застосування композицій – термальній формам запису [15].

Нехай задані m функцій однакової арності, наприклад, $k - f_1, \dots, f_m$, m -арна функція f та k -арний предикат h , $m, k \in N$. Розглянемо наступні нові k -арні функції g, d, c , значення яких на аргументі a_1, \dots, a_k задаються так:

$$g(a_1, \dots, a_k) \cong f(f_1(a_1, \dots, a_k), \dots, f_m(a_1, \dots, a_k)),$$

$$d(a_1, \dots, a_k) \cong \begin{cases} f_1(a_1, \dots, a_k), \text{ якщо } h(a_1, \dots, a_k) = T \\ f_2(a_1, \dots, a_k), \text{ якщо } h(a_1, \dots, a_k) = F \end{cases}$$

$c(a_1, \dots, a_k) \cong a_j^i$, де a_j^i – перша компонента першого кортежу послідовності кортежів $[a_1^i, \dots, a_k^i]_{i=1,2,\dots}$, де $a_s^1 = a_s, s = 1, \dots, k$, $a_s^{i+1} = f_s(a_1^i, \dots, a_k^i)$, для якого $h(a_1^i, \dots, a_k^i) = F$, за умови, що для усіх $r = 1, \dots, j-1$ значення $h(a_1^r, \dots, a_k^r) = T$, (\cong – розуміється як умовна рівність).

Будемо казати, що функція g є результатом застосування композиту $m+1$ -арної суперпозиції S^{m+1} до кортежу функцій f, f_1, \dots, f_m , функція d – композиту тернарної операції розгалуження \diamond до кортежу функцій h, f_1, f_2 , а c – композиту $k+1$ -арного циклування до кортежу h, f_1, \dots, f_k . Тобто, $g \equiv S^{m+1}(f, f_1, \dots, f_m)$, $d \equiv (h, f_1, f_2)$ та $c \equiv *^{k+1}(h, f_1, \dots, f_k)$.

Позначимо $[\sigma]_k$ замикання множини функцій та предикатів σ операціями ППА, 0^1 – т. з. 0-функцію, щобудь-якому натуральному числу ставить у відповідність 0, тобто: $S^2(0^1, I_1^1)(n) = 0 \mid_{n \in N}$, s^1 – функцію слідування: $S^2(s^1, I_1^1)(n) = n + 1 \mid_{n \in N}$, $+$ – суму двох натуральних чисел: $S^3(+^2, I_1^2, I_2^2)(n, m) = n + m \mid_{n, m \in N}$, \times^2 – добуток двох натуральних чисел: $S^3(\times^2, I_1^2, I_2^2)(n, m) = n \times m \mid_{n, m \in N}$, $<^2$ – предикат «менше»: $S^3(<^2, I_1^2, I_2^2)(n, m) = \begin{cases} T, \text{ якщо } n < m \\ F, \text{ якщо } m \leq n \end{cases} \mid_{n, m \in N}$ та I_n^m – селекторну функцію: $I_n^m(a_1, \dots, a_m) \mid_{n, m \in N} = \begin{cases} a_n, \text{ якщо } n \leq m \\ \text{інакше} \end{cases}$.

Справедливо: $[0^1, s^1, +^2, \times^2, <^2, I_n^m]_\Omega = \mathcal{F}$ [16]. Даний результат разом з вибором операцій з Ω у якості актуалізації базових генетичних структур (композитів) ТСП забезпечує логіко-предметну основу для продуктивної специфікації арифметичної ТСП. Для цього принциповим є інтерфейс між композитами на подальше розширення фактології для вдосконалення методу програмної релятивізації.

з Ω та похідними від них композиціями. Обумовлені композитами редукційні структури, як було показано у [4] відіграють ключову роль у побудові таких інтерфейсів. Це забезпечує головну особливість створюваних таким чином ТСП – вони реально, а не лише номінально підтримують причинно-наслідкове взаємодоповнення двох складових вирішення будь-якої програмістської задачі – програмування як породження та застосування композицій та програми як наслідку програмування.

Висновки. Досліджено та обґрунтовано необхідність змін у технологічних засадах програмування, що передбачає перехід від індивідуально-суб'єктної парадигми програмування до інтерсуб'єктивної парадигми, яка дозволить перейти від мистецтва програмування до його технологізації. У цьому контексті створюється відкрито-замкнене оракульне середовище програмування на основі закритої інтерсуб'єктивної логіки та різноманітності предметних суб'єктно-орієнтованих розширень, спрямованих на врахування активної ролі суб'єкта у програмуванні.

Центральною для об'єктивізації активної ролі суб'єкта у технологічному середовищі програмування є концептування, де концепт представляється суб'єктом умовою у вигляді певної специфікації. Це концептування формує основу відкритого-закритого концептопрограмного технологічного середовища, яке інтерпретує програмування як суб'єкто-орієнтовану продуктивну діяльність, обумовлену програмою.

Програмування розглядається як діяльність, обумовлена програмним уподібненням – суб'єктно-орієтованим взаємодоповненням активної та пасивної форм, що обумовлюється програмою. Отже, об'єктивізація активно-пасивного взаємодоповнення визначається програмою – сутністю, що обумовлюється концептом. У цьому контексті концепт забезпечує цілісність побудов, тоді як програма – їх продуктивність.

Продуктивність програмування досягається за допомогою композитних схем, де абстракції відповідних суб'єктних умов розглядаються як оракули. Концептуально-монадне середовище програмування розглядається як оракульне середовище. Подальші дослідження будуть спрямовані

Список літератури:

1. D. E. Knuth, The Art of Computer Programming. Addison-Wesley Professional, 2011.
2. І.В. Редько, П.О. Яганов, Концептуальна модель технологічного середовища програмування, Наукові вісті КПІ, № 1, с. 18-26, 2020. DOI: 10.20535/kpi-sn.2020.1.197953.

3. I. Redko, P. Yahanov and M. Zylevich, Concept-Monadic Model of Technological Environment of Programming, 2020 IEEE 2nd International Conference on System Analysis & Intelligent Computing (SAIC), Kyiv, Ukraine, 2020, pp. 125-130, doi: 10.1109/SAIC51296.2020.9239204.
4. І.В. Редько, П.О. Яганов, М.О. Зилевич, Редукційне концептування оракульних схем, Системні дослідження та інформаційні технології, № 1, с. 21-33, 2021. doi: 10.20535/SRIT.2308-8893.2021.1.02
5. І.В. Редько, Прагматичні основи дескриптивних середовищ, Проблеми програмування, № 3, с. 3-25, 2005.
6. Г.В. Лейбніц, Монадологія, Sententiae, № 1, с. 151-177, 2013.
7. В.Н. Редько, Композиції програм і композиційне програмування, Програмування, № 5, с. 3-24, 1978.
8. В.Н. Редько, Дефінітори, метод дефініторного процесування, Кібернетика, № 6, с. 52-56, 1974.
9. І. А. Басараб, Н. С. Нікітченко, В.Н. Редько, Композиційні бази даних. – К. : Либідь, 1992.
10. В.Н. Редько, Основи програмології, Кібернетика і системний аналіз, № 1, с. 35-57, 2000.
11. В.Н. Редько, Основи композиційного програмування, Програмування, № 3, с. 3-13, 1979.
12. В.Н. Редько, Н.В. Гришко, І.В. Редько, Експлікативне програмування у середовищі логіко-математичних специфікацій, УкрПРОГ98, с. 71-76, 1998.
13. І.В. Редько, Н.В. Гришко, Експлікативне програмування у інтеграційному середовищі, Проблеми програмування, № 2, с. 59-65, 2004.
14. D. I. Redko, I. V. Redko, P. O. Yahanov and T. L. Zakharchenko, Compositional basis in programmer activity, Системні дослідження та інформаційні технології, no. 4, pp. 83-96, 2015.
15. K. V. Gemlau, L. Köhler and R. Ernst, A Platform Programming Paradigm for Heterogeneous Systems Integration, in Proceedings of the IEEE, vol.109, no. 4, pp. 582-603, April 2021, doi: 10.1109/JPROC.2020.3035874.
16. Д. Б. Буй, Теорія програмних алгебр композиційного типу та її застосування: Дис. докт. фіз.-мат. наук: Київ, 2002.
17. J. Printz, D. Krob. System Architecture and Complexity: Contribution of Systems of Systems to Systems Thinking. JOHN WILEY, 2020.

Redko I.V., Yahanov P.O., Zylevich M.O. CONCEPTUAL FOUNDATIONS OF TECHNOLOGICAL PROGRAMMING SYSTEMS

The article investigates and substantiates the need for paradigmatic changes in the technological foundations of programming, the transition from an individual-subjective paradigm of programming to an intersubjective one, the basis of which is the evident premise of a holistic understanding of programming as an activity determined by a program. The development of this paradigm, in particular the technological environment of programming as a platform for software relativization, is a step-by-step productive enrichment of the premise of holistic understanding. Programming is considered in the context of modernizing its understanding as an activity conditioned by program likeness, and subject-oriented complementarity of its active and passive forms. The objectification of active-passive complementarity is the main prerequisite for the real modernization of the understanding of programming as a reflexive-transitive closure of the subject-generated program likeness. Decisive for the objectification of the subject's active role in the context of constructions in the programming environment is the concept – essence – assimilation of the mentioned medium, presented in the form of one or another specification. The tool of logical-mathematical specifications of semantic-syntactic aspects of programming is tested on examples, and the general features of the application of the technological programming environment to the generation of subject-oriented technological programming systems and their use are demonstrated. The considered examples of solving problems in the arithmetic system of programming demonstrate important general features of the reductive conceptualization of oracle schemes. This is, first of all, the guaranteed correctness of the obtained solutions, which follows directly from their construction. Secondly, the possibility of transition from solving individual problems to solving classes of similar problems. And, thirdly, the obtained solutions can be implemented on different syntactic software platforms.

Key words: concept, monad, composite, composition, reduction, oracle schemes, programming environment.

Сікора О.В.

Дрогобицький державний педагогічний університет імені Івана Франка

Кобильник Т.П.

Дрогобицький державний педагогічний університет імені Івана Франка

JAVA ЯК ЗАСІБ НАВЧАННЯ УЧНІВ ОСНОВ ПРОГРАМУВАННЯ

На сьогоднішній день широко поширені мови програмування, які стають більш простими та зручними. Ринок праці вимагає ІТ фахівців, які б могли розробляти і впроваджувати програмні продукти. Підготовка таких спеціалістів повинна починатися зі школи. В статті порушена проблема вибору мови програмування в шкільній освіті, яка є актуальною і складною. Вказано на важливість формування і розвиток алгоритмічних навичок учнів при формуванні ІТ-компетентностей. Доведено що сьогоднішня шкільна освіта з питань формування інформатичних компетентностей вимагає більш ефективних форм, методів і засобів навчання з вдосконалення методичної системи навчання інформатики в загальній середній школі. Це дасть можливість учням усвідомити зв'язок між теоретичним матеріалом та прикладною інформатикою, вміти та знати способи застосування інформаційних технологій для рішення прикладних задач. В статті акцентовано, що немаловажне значення при навчанні учнів має формування цифрової компетентності вчителя, що вимагає від педагога безперервного самовдосконалення та самоосвіти.

В роботі доведено, що активне впровадження в освітній процес цифрових технологій на базі сучасних новітніх комп'ютерів, з покращеними характеристиками, оснащених новими програмними продуктами є сьогодні доступне і можливе. Аналіз шкільних підручників показав, що багато авторів відмовляються від Free Pascal середовища Lazarus, а вводять вивчення більш сучасних систем програмування, таких як Python, Java. Навчальними програмами з інформатики не вказано конкретної мови програмування, яку б мали вивчати учні шкільного курсу. Це обирає сам вчитель або заклад в залежності від технічного забезпечення школи, програмного забезпечення та здібностей і можливостей учнів. На основі аналізу наукових публікацій і власних міркувань, в статті обгрунтовано вибір мови програмування Java, що є кросплатформною, зрозумілою, доступною, яка займає одне із перших місць в програмістських колах і може бути використана в шкільній програмі для вивчення алгоритмізації і програмування.

У статті наведено приклади, які могли б бути використанні на уроках інформатики. Показано словесний опис алгоритму, блок-схему та програмний код. Зосереджено увагу на формуванні алгоритмічного мислення учнів, а мову програмування рекомендовано використовувати як допоміжний засіб.

Ключові слова: програмний код, мови програмування, алгоритми, самоосвіта, мова програмування Java.

Постановка проблеми. Сьогодні у світі швидкими темпами розвивається ІТ-галузь, а з нею і зростає потреба в фахівцях, які могли б розробляти сучасні програмні продукти. Вивчення основ алгоритмів, формування логічного мислення, базові навички розробки проєктів слід починати у шкільному віці. У цьому аспекті слід відмітити досить глибокий аналіз теоретичних аспектів порушеної проблеми, що знайшло своє відображення в багатьох літературних джерелах, водночас є колізія, пов'язана з відставанням практичного втілення новітніх комп'ютерних засобів і теоретичних рецептів від наукових досягнень, що зв'язано з консервативністю традиційної думки, ніби лише наявність комп'ютерів у навчальному закладі вже повністю вирішує проблему підвищення ефективності навчання, але при цьому зовсім ігноруючи обставини оцінки того факту,

що залучення комп'ютерів в навчальний процес вимагає значних впливань матеріального характеру, що передбачає створення нових методик, виділення часу під їх створення та практичного втілення, а особливо, наявність висококваліфікованих наукових кадрів та підготовлених професіоналів в комп'ютерній науці, здатних втілити в практику теоретичні напрацювання. Можна стверджувати, що головна проблема насичення освіти інформаційними технологіями полягає в тому, що викладачі-практики скептично ставляться до всього нового в освітній галузі вважаючи, що використання нової технічної бази, яка навіть більшість з них лякає, лише ускладнює існуючу дидактичну систему, що обумовлюється низкою психологічних, психофізичних та факторів, а також необхідністю формування нової філософії сприйняття нових форм і методів навчання.

Активне впровадження в освітній процес сучасних цифрових технологій на базі сучасних новітніх комп'ютерів, з покращеними характеристиками, оснащених новими програмними продуктами є сьогодні доступне і можливе через:

- Виклад нового навчального матеріалу з можливістю візуалізації отримуваних знань і навичок шляхом залучення програмних продуктів типу створення презентацій, програм у формі відеофільмів наповнених елементами демонстраційно-енциклопедичного змісту.

- Активне використання навчальних програм у віртуальному процесі виконання віртуальних лабораторних робіт.

- Залучення різнотипних програмних продуктів (навчальні програми, проведення лабораторних робіт і практичних занять у відеорежимі, програми з функціями тренінгу) у завершальній стадії навчання – закріплення викладеного контенту.

- Формування нової контролюючої системи контролю за рівнем і перевіркою набутих учнями знань – розроблення тестів з можливістю ефективного оцінювання, створення програм, наділених контролюючими функціями.

- Передбачення активізації самостійності роботи учнів шляхом залучення програм з елементами ігор і можливостями розвитку знань і навичок, що можливе завдяки насиченню просунутого інтерфейсу і якісної анімації, програм у формі добре продуманого лекційного матеріалу та широким наданням при цьому візуалізованих енциклопедичних даних.

- У процесі викладу навчального матеріалу значно скорочується процедура використання пояснювально-ілюстративної технології під час занять та перехід до використання інтегрованих занять за методом проектів, що передбачає можливість втілювати із залученням найновіших інтернет-технологій елементів науково-дослідницького характеру.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Незважаючи на латентний опір старих педагогічних кадрів, хоч і повільно, але поступово і неухильно відбувається інвазія сучасних інформаційно-комп'ютерних технологій в навчальний процес, про що переконливо свідчать результати досліджень, викладених в працях [2, 3, 4]. Переконливі факти щодо вивчення мови Java в шкільному курсі наводить С.М. Іщеряков [1], який пропонує вивчати її уже з п'ятого класу, де «Програмувати можуть не поодинокі ІТ-генії шкільного віку, а всі цілеспрямовані учні». Пере-

конливим фактом називає можливість програмування під Android, що є актуальним сьогодні. Крім того версія JavaSE8 містить елементи функціонального програмування, що сприятиме вивченню ще однієї сучасної парадигми об'єктного програмування. Питанню вивчення мови програмування у старшій школі займалися Глинський Я.М., Палюшок Л.В. [2], Юрченко А.О., Семеніхіна О.В. [3], Руденко В.Д., Жугастров О.О. [4] та інші. Сучасним підходам до навчання основ програмування учнів школи присвячені роботи О.М. Спіріна, С.С. Жуковського, О.І. Кривоноса та інших авторів. Методичні підходи до навчання програмування у школі та навчальних закладах досліджують М.І. Жалдак, Н.В. Морзе [5], Ю.С. Рамський, О.М. Спірін [6], С.О. Семеріков та інші.

Мета статті – обґрунтування вибору мови Java як засобу навчання учнів основ програмування.

Виклад основного матеріалу дослідження. Сьогодні жодна галузь людського суспільства, чи медицина, чи освіта, чи економіка, чи транспортний напрямок не обходиться без комп'ютерних технологій. Кожен такий напрямок користується своїми відповідними програмами, які створюються ІТ фахівцями, що є затребувані на ринку праці. Дедалі все більш необхідними стають програмісти з розробки сайтів, із захисту інформаційних даних, штучного інтелекту та інші. Саме вони можуть розробляти програмне забезпечення, що підтримує роботу сайтів, організацій, фірм, банків. Кожен такий фахівець повинен володіти технічною англійською мовою, вміти швидко вчитися, мати аналітичний склад розуму, знати мову програмування. Для того щоб володіти такими якостями діти повинні вивчати основи програмування з раннього дитинства. Вчителі інформатики на своїх уроках використовують таке середовище, як "Scratch", де на практичних завданнях доступно, легко і якісно з використанням мультимедійного середовища та ігрових компонент підвищують зацікавленість учнів до навчання алгоритмізації та програмування. Якщо учні ознайомлені з базовими поняттями та елементами алгоритмізації, тоді легше дається вивчення мов програмування, які без попередньої підготовки освоїти складно. Кожне наступне покоління є більш прогресивне у використанні інформаційних технологій в порівнянні з попереднім. Все це диктується сучасною інформатизацією суспільства. Зміни суспільного життя викликають і зміни у освітньому процесі. Однією з таких приємних і позитивних змін є вивчення мови програмування в шкільному курсі.

Мова Java – одна з найпопулярніших мов програмування, за допомогою якої ІТ фахівці створюють різні програмні продукти для телефонів, смартфонів, комп’ютерів та інших пристроїв. Характерною перевагою цієї мови є те, що вона може працювати під управлінням будь-якої операційної системи без повторної компіляції коду.

Сьогодні у світі є велика кількість мов програмування, однак Java є однією із затребуваніших мов серед інших, оскільки 65% усіх додатків, програмних продуктів розроблені саме нею. Використання мов програмування в 2023 році згідно рейтингу IEEE Spectrum можна показати діаграмою (рис. 1). Як бачимо з рисунка мови Python та Java займають перші провідні місця.

Велика увага до мови Java викликана наявністю певних особливостей цієї мови, так само як і будь-якої іншої. Серед них можна виділити:

1. Кросплатформність. Дякуючи присутній віртуальній машині Java, або Java Virtual Machine написаний код працює під керуванням різних опе-

раційних систем та з використанням довільної апаратної платформи.

2. Ком’юніті. На Java сьогодні розробляється велика кількість сайтів, програмних продуктів для роботи магазинів, фірм, офісів та ін. Наявність великої кількості бібліотек дозволяє створювати найрізноманітніші проекти. Якщо виникають питання то існують форуми де можна вивчити окремі питання за допомогою звернень до ком’юніті.

3. Надійність. Розробка проектів мовою, типізованість змінних на час компіляції спрощує сам процес відлагодження.

4. Мова Java строго типізована, де кожна змінна, вираз на момент її використання має мати визначений тип, що спрощує виявлення будь-яких помилок. Компілятор підказує розробнику на помилки.

5. Об’єктно-орієнтованість. Java характеризується великою кількістю бібліотек, де кожна із них це клас, що несе в собі деяку функціональ-

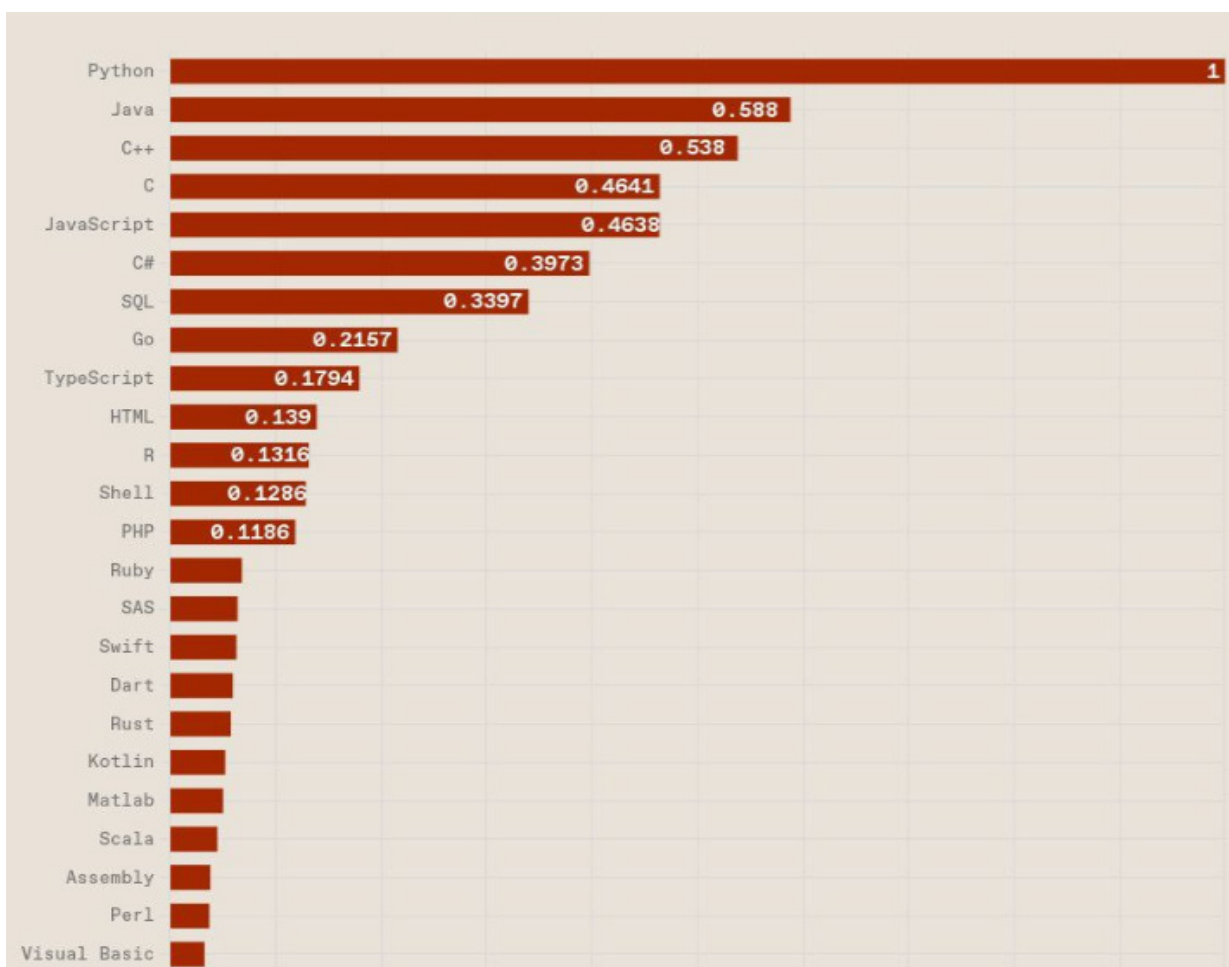


Рис. 1. Найпопулярніші мови програмування серед ІТ-спеціалістів у 2023 згідно рейтингу IEEE Spectrum

ність мови. Любий додаток – це сукупність класів, що описують різні об’єкти. Це одна із переваг, оскільки можна створювати складні, але прості у підтримці програми. Мова Java – мультипарадигмна мова, яка містить багато принципів програмування, що сприяє ефективному вирішенні прикладних проблем.

6. Відносна простота. Мову Java не так легко вивчити, але вона набагато простіша за мову C або C++. Функціональність мови оновлюється повільно, тому можна легко переходити на нові версії – заново вивчати не доведеться. Java – строго типізована мова, а значить легко бачити помилку в коді при компіляції.

7. Гнучкість. На Java можна розробляти проекти будь-якої складності.

Немаловажне значення при навчанні учнів має формування цифрової компетентності вчителя, що вимагає від педагога безперервного самовдосконалення та самоосвіти.

Вивчення основ програмування слід починати з вивчення основ алгоритмізації. Перш за все учнів треба привчати до складання алгоритму розв’язування задачі, а потім до його реалізації мовою програмування. З поняттям алгоритмізації учні не зустрічаються в повсякденному житті, але алгоритми постійно присутні у різних видах роботи, чи то розв’язування задачі, чи приготування чаю, чи організація свого робочого дня та інше. На перших заняттях учитель повинен повідомити учнів про поняття алгоритму і підтвердити це прикладами. Слід відмітити і те, що кожен алгоритм записується під конкретного виконавця, тобто алгоритм написаний для учня не може бути виконаний комп’ютером. Кожен алгоритм повинен бути скінченним і кожна команда чітко визначена. Алгоритми мають носити масовий характер, тобто складений алгоритм для вирішення однієї прикладної задачі повинен розв’язувати цілий клас однотипних задач. Вивчення алгоритмів має проводитися на прикладах з повсякденного життя учнів і вони мають виступати виконавцями простих алгоритмів. Алгоритми можна задавати словесно, блок-схемами, формульно та ін. Немаловажне значення при навчанні учнів має формування цифрової компетентності вчителя, що вимагає від педагога безперервного самовдосконалення та самоосвіти.

Використання допоміжних алгоритмів є важливим і їх використання слід застосовувати з початкових занять. Це дозволить навчати учнів розбивати велику задачу на окремі підзадачі і всновлювати між ними логічний зв’язок. Далше з учнями можна вивчати циклічні структури, але тут вчитель повинен їх підготувати теоретично, показати їх використання і реалізацію за допомогою блок-схем, досконало розібрати роботу кожного блока, а потім уже переходити до

рішення практичних задач. Вивчення алгоритмічних структур можна завершити блоком розгалуження, де початково навести приклади з оточуючого середовища, а лише після цього розв’язувати практичні задачі.

Перехід до мови програмування вимагає не обов’язково зосереджуватися на конкретній мові програмування, а на навчанні основ програмування. Мова, яку можна застосовувати до вивчення в шкільному курсі інформатики не повинна мати складного синтаксису і середовища розробки, але вона одночасно не може бути старого покоління, оскільки ІТ галузь швидко розвивається учні мають знайомитися з сучасними мовами програмування. Для того щоб обрати мову програмування слід чітко сформулювати критерії вибору першої мови програмування для навчання учнів у школі, і це повинно включати: транслятор мови повинен бути кросплатформним і безкоштовним, повинен бути простий синтаксис, програми мають бути короткі і зрозумілі, ця мова має бути одна з перших затребуваних мов, містити достатню кількість бібліотек, і на нашу думку це може бути мова програмування Java.

На сьогоднішній день мова Java є однією з найбільш затребуваних серед ІТ фахівців для створення вебдодатків та Android-додатків для смартфонів і планшетів. Вона використовується для створення прикладних додатків для гаджетів, смартфонів, комп’ютерів, роботів та інших інтелектуальних приладів. Особливістю роботи є те що вони можуть працювати на різному апаратному забезпеченні та під управлінням різних операційних систем. Сьогодні широко використовується платформа JavaFX, яка містить набір графічних та медіа бібліотек, які програміст може використовувати для проектування, створення, програмування додатків з графічним інтерфейсом, що працюють на різних комп’ютерних пристроях з різними операційними системами.

Базовим об’єктом мови Java є клас який складається із двох частин: полів та методів. В поля записуються дані, які входять в клас або задають характеристики об’єкта. Методи включають набір операторів, за допомогою яких опрацьовуються дані.

Змінні повинні попередньо бути оголошені, тобто віднесені до певного типу і мають можливість в процесі роботи програми міняти свої значення. Формат оголошення змінних наступний:

```
тип ідентифікатор [=значення]
[;ідентифікатор[=значення]...];
```

Наприклад:

```
int k,l,n;
int k=10, m, n=25;
byte j=15;
double pi=3.1415926;
char s;
```

Як уже зазначалося, що вивчення мови програмування слід починати із вивчення основ алгоритмізації та вибору транслятора мови кро-сплатформного та безкоштовного, мови з простим синтаксисом, наявністю розвинених бібліотек, де програми мають бути простими і зрозумілими. Саме таким критеріям сьогодні відповідають мови Python та Java, які можна використовувати в шкільному курсі інформатики для вивчення мови програмування. Щоби зацікавити учнів, привити любов до програмування потрібно вчителю методично грамотно вибирати задачі для пояснення та рішення. Обов'язково рухатися від простих задач до складніших, основне при цьому особливу увагу звертати на підбір алгоритму розв'язування. Розглянемо наступні задачі:

Приклад 1. Наповнити корзину яблуками.

Опишемо алгоритм словесно-аналітично.

1. В корзину кладемо яблуко.
2. Якщо корзина повна то переходимо до пункту 3, а якщо ні – до пункту 1.
3. Виводимо повідомлення «Корзина повна».
4. Кінець.



Рис. 2. Блок-схема наповнення корзини

Приклад 2. Отримати розв'язки квадратного рівняння $ax^2+bx+c=0$ з дійсними коефіцієнтами $a (a \neq 0), b, c$.

Опишемо алгоритм словесно-аналітично.

1. Ввести значення коефіцієнтів при невідомих a, b, c .
2. Обчислити дискримінант $D=b^2-4ac$.
3. Якщо $D \geq 0$, то знаходимо корені $x_1=(-b-\sqrt{D})/(2a)$, $x_2=(-b+\sqrt{D})/(2a)$, інакше – п.7.
5. Вивести значення x_1, x_2 .
6. Перейти до пункту 8.
7. Вивести повідомлення «Рівняння не має дійсних коренів».
8. Кінець.

Запишемо блок-схему даного алгоритму (рис. 3):

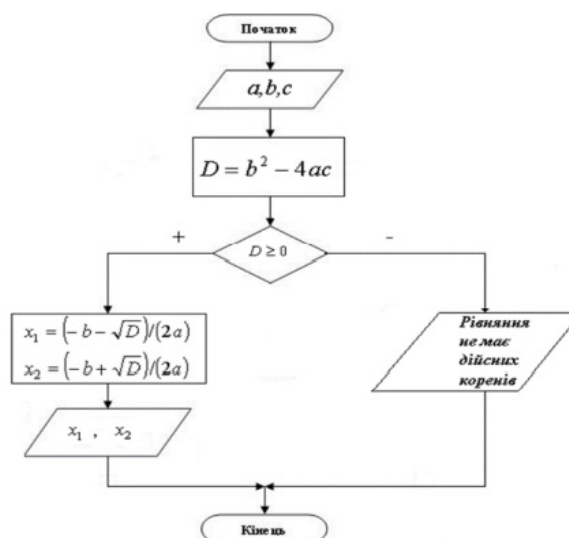


Рис. 3. Блок-схема розв'язування квадратного рівняння

На основі розробленого алгоритму запишемо програмний код на мові Java для знаходження дійсних коренів квадратного рівня.

```
package kv_riv;
import java.util.Scanner;
public class kv_riv {
    public static void main(String[] args) {
        double a,b,c;
        double D;
        System.out.println("Програма розв'язує квадратне рівняння виду");
        System.out.println("a*x^2+b*x+c=0");
        System.out.println("Введіть a,b,c");
        Scanner in = new Scanner(System.in);
        a = in.nextDouble();
        b = in.nextDouble();
        c = in.nextDouble();
        D=b*b-4*a*c;
        if (D>=0) {
            double x1, x2;
            x1=(-b-Math.sqrt(D))/(2*a);
            x2=(-b+Math.sqrt(D))/(2*a);
            System.out.println("Корені рівняння: x1 = " + x1 + ", x2 = " + x2);
        }
        else if (D == 0) {
            double x;
            x = -b / (2 * a);
            System.out.println("Рівняння має єдиний корінь: x = " + x);
        }
        else {
            System.out.println("Рівняння немає дійсних коренів!");
        }
    }
}
Програма розв'язує квадратне рівняння виду
a*x^2+b*x+c=0
Введіть a,b,c
1
-8
15
Корені рівняння: x1 = 3.0, x2 = 5.0
```

Рис. 4. Програмний код для розв'язування квадратного рівняння

При роботі з цим програмним продуктом слід продемонструвати результати виконання його при різних значеннях параметрів a , b , c , в тому числі і при значенню $a=0$. Слід відмітити, що задачі з параметрами сприяють розвитку в учнів логічного мислення, вміння аналізувати, формують навички дослідницької діяльності. У мові Java є можливість багаторазових перевірок певних критеріїв з використанням оператору вибору `switch`, який є близьким до оператора умовного переходу `if - else` і організовує багато розгалуження. Тут можна пропонувати різні задачі вибору, а саме за значенням n вивести назву дня, перевірити чи рік високосний, перевірити чи на шахматній дошці дві клітинки одного кольору і т. д.

Приклад 3. За заданим значенням n вивести назву відповідного дня тижня. Врахувати можливі помилкові значення n .

```
package day;

import java.util.Scanner;

public class day {

    public static void main(String[] args) {
        int n;
        System.out.println("Введіть номер дня");
        Scanner in = new Scanner(System.in);
        n = in.nextInt();
        if (n==1)
            System.out.println("Понеділок");
        else if (n==2)
            System.out.println("Вівторок");
        else if(n==3)
            System.out.println("Середа");
        else if(n==4)
            System.out.println("Четвер");
        else if(n==5)
            System.out.println("П'ятниця");
        else if(n==6)
            System.out.println("Субота");
        else if(n==7)
            System.out.println("Неділя");
        else
            System.out.println("Такого номера дня тижня немає");
    }
}
Введіть номер дня
4
Четвер
Введіть номер дня
9
Такого номера дня тижня немає
```

Рис. 5. Реалізація багатоальтернативного вибору

Приклад 4. Знайти всі прості числа з діапазону $[2, 100]$.

Цю задачу доцільно рішення з використанням вкладених циклів. Оскільки відомо в яких межах має змінюватися параметр циклу то будемо використовувати оператор циклу `for`.

```
public class Prosti {

    public static void main(String[] args) {
        for (int i=2;i<=100;i++) {
            boolean isPrime=true;
            for (int j=2; j<i;j++) {
                if(i%j==0) {
                    isPrime=false;
                    break;
                }
            }
            if (isPrime)
                System.out.println(i);
        }
    }
}
```

Рис. 6. Програмний код для знаходження простих чисел

Висновки. Проаналізувавши можливості і переваги мови програмування Java вважаємо, що її можна використовувати для вивчення мови програмування в шкільному курсі для старших класів, тому що:

- є кросплатформною мовою програмування і дозволяє розробляти програми, що працюють під керуванням будь якої операційної системи;
- це універсальна мова, яка використовується в мобільних додатках, суперкомп'ютерах, наукових колах, ігрових консолях, мобільних телефонах, мережевих застосунках;
- відносна простота цієї мови, спочатку важко з нею працювати, але коли освіїв ази тієї мови то не хочеться переходити на іншу мову;
- велика кількість бібліотек, що місять готові процедури, які в попередніх мовах приходилось програмувати;
- гнучкість цієї мови дозволяє розробляти проекти довільної складності, а саме програмні продукти банків, офісів, інтернет-магазинів, мобільні додатки та ін.

Щодо методичних особливостей вивчення мови програмування Java то:

– вивчення мови Java необхідно починати з основ алгоритмізації що дозволить в учнів сформулювати алгоритмічне мислення, що в подальшому буде основою програмування;

– повинна бути практична спрямованість курсу, необхідно вводити поняття курсу використовуючи приклади з життя учнів і вони мають виступати виконавцями алгоритмів;

– вивчення елементів мови потрібно від простішого до складнішого;
– кожному темі закріплювати практичними завданнями;

Перспективи подальших досліджень.
Подальші дослідження будуть спрямовані на використання мови Java для розв'язування оптимізаційних задач.

Список літератури:

1. Іщераков С.М. Вчити програмування треба в школі чи університеті? URL: <https://osvita.ua/school/54063/>
2. Глинський Я.М., Палюшок Л.В. Яку мову програмування вивчати у школі (матеріали для дискусії). Комп'ютер у школі та сім'ї. 2013. № 8. С. 9-18.
3. Юрченко А.О., Семеніхіна О.В. та ін. Навчання програмувати в старшій школі крізь призму чинних навчальних програм. // Фізико-математична освіта, випуск 2(20), частина 2, 2019. С. 48.
4. Руденко В.Д., Жугастров О.О. Перші кроки програмування мовою Java : навчальний посібник для учнів 10 - 11 класів. Х.:РАНОК, 2018. 112 с.
5. Н. В. Морзе, Методика навчання інформатики, Київ, Україна: Навчальна книга, 2004.
6. О. М. Спірін, та П. Г. Шевчук, "Порівняльний аналіз програмних технологій операційної системи Windows 8 для навчання програмування", Інформаційні технології та засоби навчання, № 2, с. 65- 73, 2014.

Sikora O.V., Kobylnyk T.P. JAVA AS A TOOL FOR TEACHING STUDENTS FUNDAMENTALS OF PROGRAMMING

Today, programming languages are widespread, which are becoming simpler and more convenient. The labor market requires IT specialists who can develop and implement software products. The training of such specialists should begin at school. The article raises the problem of choosing a programming language in school education, which is relevant and difficult. The importance of the formation and development of students' algorithmic skills in the formation of IT competencies is indicated. It has been proven that today's school education on the formation of informatics competences requires more effective forms, methods and means of learning to improve the methodical system of teaching informatics in the general high school. This will enable students to understand the connection between theoretical material and applied informatics, to be able to and know how to use information technologies to solve applied problems. The article emphasizes that the formation of the teacher's digital competence is of great importance in the education of students, which requires continuous self-improvement and self-education from the teacher.

The work proves that the active implementation of digital technologies in the educational process based on the latest modern computers, with improved characteristics, equipped with new software products is available and possible today. Analysis of school textbooks showed that many authors abandon the Free Pascal environment of Lazarus, and introduce the study of more modern programming systems, such as Python, Java. Computer science curricula do not specify a specific programming language that school students should learn. This is chosen by the teacher or the institution, depending on the technical support of the school, software and the abilities and capabilities of the students. Based on the analysis of scientific publications and own considerations, the article substantiates the choice of the Java programming language, which is cross-platform, understandable, accessible, which occupies one of the first places in programming circles and can be used in a school program to study algorithmization and programming.

The article provides examples that could be used in computer science classes. A verbal description of the algorithm, a block diagram, and the program code are shown. Attention is focused on the formation of students' algorithmic thinking, and it is recommended to use the programming language as an auxiliary tool.

Key words: *program code, programming languages, algorithms, self-education, Java programming language.*

Скілков Н.В.Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

АНАЛІЗ ЧАСОВИХ ХАРАКТЕРИСТИК ЗАДАЧ У КОМП'ЮТЕРНИХ СИСТЕМАХ РЕАЛЬНОГО ЧАСУ

У статті розглянуто проблеми визначення часових характеристик задач у комп'ютерних системах реального часу. Зазначається, що для проектування системи реального часу потрібно вирішити цілий комплекс доволі складних задач, які складаються з функціональної частини, вибору оптимальних технічних засобів задля вирішення поставленої задачі, а також компоновки попередніх задач у єдину цілу оптимальну операційну систему реального часу. Підкреслено, що вирішення цілісної задачі складається з двох напрямків, теоретичного обґрунтування та моделювання реалізації. Методи реалізації формуються на базі статичних моделей та моделей побудованих за допомогою сіток Петрі. Наголошується, що розробка моделей за допомогою апарату сітки Петрі ґрунтується на ідеї розділення аналогової величини – часу виконання певної задачі на процесорі на дискретні кванти, які в свою чергу передаються між позиціями в сітці Петрі як маркери. Сформовано набір параметрів задачі реального часу та здійснено обґрунтування етапу розділення задачі на підзадачі. Графічно представлено задачу змодельовану на одному з процесорів, описано сукупність переходів. Запропоновано загальну схему моделювання для більш детального розуміння процесу. Наведено задачу з вкладеною множиною задач розміткою JSON. Зазначається, що генератор черги задач в свою чергу розпаковує такий список задач у «плоский» список, де всі три задачі рівноправні і поступають у диспетчер задач у такому вигляді та мають свої незалежні часові характеристики. Доведено, що за рахунок того що підзадачі будуть виконані не пізніше ніж їх коренева задача, це дозволяє оперувати ними, як незалежними задачами і застосувати до них запропонований метод моделювання багатопроцесорних систем.

Ключові слова: багатопроцесорна система, моделювання, метод, часова характеристика, задача, підзадача.

Постановка проблеми. В системах реального часу, крім стандартних вимог до логічної послідовності програми також, існують обмеження на час виконання та кінець виконання (абсолютний дедлайн) кожної задачі, що призводить до критичних похибок та неправильної роботи системи загалом при неправильній оцінці часових характеристик [1].

Задля успішного проектування системи реального часу потрібно вирішити цілий комплекс доволі складних задач, що у собі складаються з функціональної частини, тобто алгоритмів логіки роботи системи, вибору оптимальних технічних засобів задля вирішення поставленої задачі а також компоновка попередніх задач у єдину цілу оптимальну операційну систему реального часу [2].

Вирішення такої складної задачі з великою кількістю аспектів складається з двох основних напрямків, де першим з них є теоретичні дослідження, які спрямовані на отриманні моделі реалізації яка має у собі усі критерії що відповідають потребам часових характеристик задач у системі

реального часу, а другим напрямком – це моделювання даної реалізації для перевірки «життєздатності» теоретичної гіпотези у різних середовищах та режимах роботи.

Задача першого напрямку доволі складна і не гарантує отримання точної моделі яка буде працювати в будь-яких випадках. Швидше, теоретичні дослідження лише можуть спрямувати принциповий напрямок реалізації та принципово оптимальні методи для списку часових характеристик системи реального часу. Тому цей напрямок є лише першим етапом розробки конкретної системи, і потребує подальшої роботи, тобто моделювання теоретичної гіпотези що б переконатись що вибрана модель реалізації задовольняє усі критерії здійсненності для потрібної системи реального часу. Існує декілька методів для реалізації другого етапу, тобто побудови моделі:

1) статичні моделі, вони спираються на використанні стандартних моделей для масового використання;

2) моделі побудовані за допомогою апарату сіток Петрі.

Статичні моделі доволі прості в використанні, але менш надійні, оскільки працюють в основному для середньостатистичних значень часових характеристик, що не є достатнім при розробці жорстким систем реального часу, але може бути достатнім для роботи с м'якими системами реального часу.

Розробка моделей за допомогою апарату сітки Петрі ґрунтується на ідеї розділення аналогової величини – часу виконання певної задачі на процесорі на дискретні кванти, які в свою чергу передаються між позиціями в сітці Петрі як маркери [3]. Таким чином сума квантів в певній позиції сітки Петрі є доступним процесорним часом, а інша позиція вказує на кількість часу процесора, що виділена конкретній задачі. Розподілення квантів, або маркерів, реалізована за допомогою імітації роботи певного планувальника і диспетчера операційної системи.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Побудову моделей на основі апарату сіток Петрі наведено у дослідженнях [4, 5]. Наприклад, у першому з них досліджено як побудувати модель завдяки розподіленню квантів процесорного часу планувальником між задачами в операційній системі реального часу, а також показано як тип планувальника та технічні характеристики процесора впливають на часові характеристики змодельованої системи реального часу.

Проте перше дослідження описує цей метод тільки для моделей що використовують один процесор.

Друге дослідження продовжує ідею цього методу і розглядає моделювання системи за допомогою апарату сіток Петрі вже багатопроцесорних систем. В ній також показано як технічні характеристики процесорів та типи планувальників впливають на характеристики побудованої моделі системи реального часу.

Однак друге дослідження може працювати лише с «плоским» списком задач, кожна з яких являється атомарною. Для широкого впровадження методу моделювання за допомогою апарату сіток Петрі необхідно проводити дослідження і моделювання систем що мають велику кількість складних задач, тобто таких що мають у собі список підзадач, кожна з яких має свої часові характеристики, які мають бути також дотримані для коректної роботи всієї системи.

Із зарубіжних авторів варто відмітити роботи таких науковців як: Блага Флорін, Поп Алін, Хуле Войчіца, Индре Клаудіу [6], Карай Мехмет, Костін Олександр [7], Сінгх Суджит, Джангід Рідді, Сінгх Гаджendra Пратап [8], Юань Фенгліан, Хуан Бо, Ван Джіпен, Пан Чунрон [9], Ло Б'янку

Ріккардо, Дейкман Ремко, Нуйтен Вім, Яарсвелд Віллем [10], Каїд Хусам, Дабван Абдулмаджид, Аль-Ахмарі Абдурахман [11] та інших.

Однак незважаючи на масштабність наукових досліджень питання актуальності даної роботи не викликає сумнівів.

Метою дослідження є моделювання, яке дозволяє використовувати багатопроцесорні та багатоядерні процесори для розробки систем, що мають складну вкладену структуру задач.

Викладення основного матеріалу дослідження. Задля використання квантів часу процесора є декілька варіантів як реалізувати розподіл:

- 1) статичний розподіл задач між процесорами;
- 2) міграція задач між процесорами;
- 3) міграція задачі, що зараз виконується, між процесорами.

Для першого варіанту процесори вважаються незалежними відносно один одного, тобто кожен окремий процесор моделюється окремо і має свій тип планувальника та набір часових характеристик задач. По суті, маємо одно процесорний метод що впроваджений для кожного процесору багатопроцесорної системи реального часу.

Другий варіант дає контроль над розподіленням задач між процесорами. Для наступної задачі процесор вибирається кожен раз та може змінюватися, якщо це необхідно. Проте задача не може змінювати процесор на інший, якщо вона вже почала виконуватися на цьому процесорі та має продовжувати виконуватися на тому ж самому процесорі на якому і почала виконуватися. Це означає що задача не має попередньої прив'язки до процесора, і однакові задачі можуть бути розміщені на різних процесорах. Завдяки динамічному розподілу задач між процесорами ефективність такого методу більша ніж попереднього, оскільки процесорний час використовується краще.

Третій варіант дає найбільший контроль над процесорним часом та використовує його оптимально. В додаток до попереднього виконувана задача може мігрувати між процесорами в системі навіть в самому процесі її виконання, тобто після переривання її виконання вона може відновити своє виконання вже на іншому процесорі. Звичайно, реалізація такого варіанту неможлива без додаткової апаратної підтримки. Потрібне спільне адресне середовище, завдяки якому наприклад дані задачі (її стан) будуть доступні для кожного з процесорів, щоб виконувана задача оновилася коректно на іншому процесорі, а також архітектурний контроль спільного записує/читання

з спільних даних, для уникнення проблем з одночасним читанням/записом цих самих даних.

Останній варіант є доповненням попередніх двох і тому немає сенсу розглядати його окремо у цій роботі, так як часові характеристики, методи та принципи планування відносно перших двох варіантів залишаються незмінними.

Розглянемо параметри задачі реального часу. У кожній задачі є такий список параметрів:

- r (Realize Time) – момент часу, коли задача потребує передачі управління їй;
- d (Absolute deadline) – момент часу, коли задача повинна бути завершена;
- S (Start time) – момент часу, в який задача реально почала вкинутися на процесорі;
- C (Completion time) – момент часу, коли задача фактично завершила роботу, виконавши свою логіку;
- D (Relative Time) – відносний крайній термін: $D = d - r$;
- E (Execution Time) – час фактичного виконання задачі: $E = c - s$;
- R (Response Time) – час відгуку: $R = c - r$;
- T – період існування задач (задається при розробці системи);

• M – множина підзадач які повинні бути виконані в рамках цієї задачі. Кожна з підзадач має такий же набір характеристик, що і «коренева» задача. Підзадача може мати пусту множину підзадач, що означає, що вона є листком (end vertex) графа задач. Параметри кожної підзадачі в множині M мають обмеження, так для кожної задачі A_k в множині M мають виконуватися обмеження:

- $d_i \leq d_r$, тобто абсолютний дедлайн має бути меншим ніж у кореневої задачі;
- $S_i \geq S_r$, підзадача не може почати виконуватися раніше ніж основна задача
- $C_i \leq C_r$, підзадача не може бути завершена пізніше ніж основна задача.

В усіх випадках i є індексом задачі в множині M , а індекс r позначає кореневу (основну) задачу яка володіє множиною M . Задача A_r може вважатися завершеною лише тоді коли всі задачі з множини M були завершені.

Для подальшої індексації номеру задачі а також номеру процесора який обробляє цю задачу застосуємо індексацію, де i – це номер задачі, а j – номер процесора на якому виконується задача. Тобто e_{ij} – це час який виконувалася задача A_i на процесорі j .

Сітка Петрі на рис. 1 демонструє як моделюється задача A_i на процесорі j . Сукупність задач A_i , які можуть бути як список «корневих» задач, так і список підзадач множини M , що належить задачі A_i . Кожна с цих задач отримує позицію P_{j0} . Конкретно ця модель більш детально розглянута у [4].

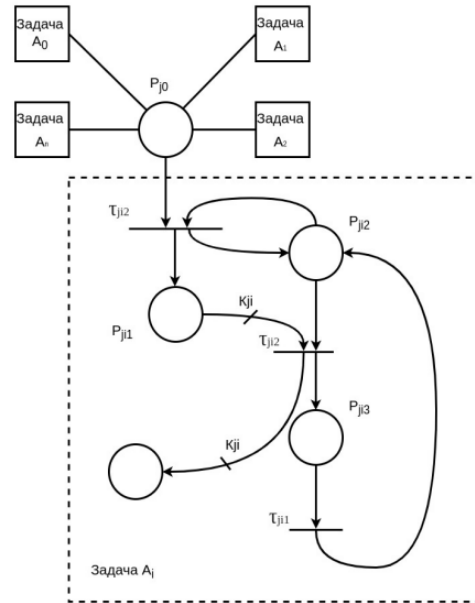


Рис. 1. Задача A_i змодельована на j -ому процесорі

Сітка Петрі – це сукупність позицій та переходів τ_{ijm} , де $m=1/3$. Орієнтовані дуги це переходи між позиціями та переходами.

Розглянемо детальніше що показує дана схема. Дуга, яка йде від позиції P до переходу τ ідентифікує вхід до переходу через позицію P . Дуга від переходу τ і до позиції P є вихідною дугою. Кількість дуг визначає кратність входів та виходів, в даній сітці Петрі за це відповідає k_{ji} , що знаходиться на дузі [12]. Детальніше ця сітка Петрі розглянута в роботі [5].

Для того щоб цей метод можливо було застосувати до складних задач, множина M яких не пуста – потрібно видозмінити генератор черги задач, який приведений як елемент на рисунку 2. Генератор черги являє собою складову багатопроцесорної моделі, що відповідає за генерацію задач в моделі багатопроцесорної системи реального часу.

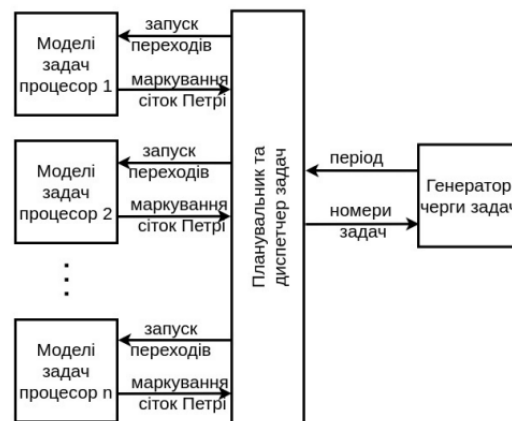


Рис. 2. Загальна схема моделювання ОСРЧ

Загалом, задачу з вкладеною множиною задач M розміткою JSON можливо описати таким чином:

```
{
  "RealizeTime": 50,
  "AbsoluteDeadline": 300,
  "StartTime": 5,
  "CompletionTime": 100,
  "T": 10000,
  "Subtasks": [
    {
      "RealizeTime": 20,
      "AbsoluteDeadline": 270,
      "StartTime": 10,
      "CompletionTime": 30,
      "T": 10000,
      "Subtasks": [
        {
          "RealizeTime": 30,
          "AbsoluteDeadline": 250,
          "StartTime": 40,
          "CompletionTime": 70,
          "T": 10000,
          "Subtasks": []
        }
      ]
    }
  ]
}
```

В даному прикладі є задача, у якої є одна підзадача також зі своєю підзадачею. Генератор черги задач в свою чергу розпаковує такий список задач у «плоский» список, де всі три задачі рівноправні і поступають у диспетчер задач у такому вигляді та мають свої незалежні часові характеристики:

```
{
  "RealizeTime": 50,
  "AbsoluteDeadline": 300,
  "StartTime": 5,
  "CompletionTime": 100,
  "T": 10000
}
```

```
},
{
  "RealizeTime": 20,
  "AbsoluteDeadline": 270,
  "StartTime": 10,
  "CompletionTime": 30,
  "T": 10000
},
{
  "RealizeTime": 30,
  "AbsoluteDeadline": 280,
  "StartTime": 40,
  "CompletionTime": 70,
  "T": 10000
}
]
```

За рахунок того що $d_i \leq d_r$, підзадачі будуть виконані не пізніше ніж їх коренева задача, що дозволяє оперувати ними, як незалежними задачами і застосувати до них цей метод моделювання багатопроцесорних систем.

Швидкість обробки та розбиття складної задачі буде мати алгоритмічну складність $O(n + k)$, де n – кількість вершин, а k – кількість ребер дерева задач. Проте якщо порівнювати цю величину з часом розв’язання задач на процесорах при їх виконанні – ця величина буде майже непомітною, оскільки цей процес робиться лише один раз для кожної нової задачі. Для оптимізації під конкретні випадки (наприклад при великій кількості однакових задач) можливо додати кеш, у якому зберігати результати переводів попередніх задач з множиною підзадач у «плоскі» масиви з рівноправними задачами.

Висновки. Запропоноване доповнення до методу моделювання багатопроцесорних систем реального часу дозволяє значно збільшити спектр використання цього методу, не потребує додаткових архітектурних та апаратних змін і гарантує правильну роботу цього методу для більш складних сценаріїв з деревом задач.

Список літератури:

1. Комп’ютерні системи реального часу: навчальний посібник / Національний технічний університет України “Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського”. В. Г. Зайцев, Є.І. Цибаєв. Київ, 2019. URL: <https://ela.kpi.ua/handle/123456789/29604>. (дата звернення: 18.08.2023).
2. Операційні системи: навчальний посібник / Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»: В. Г. Зайцев, І.П. Дробязко. Київ, 2019. URL: <https://ela.kpi.ua/handle/123456789/29600>. (дата звернення: 18.08.2023).
3. Супруненко О. Комбінований підхід до імітаційного моделювання динаміки програмних систем на основі інтерпретацій мереж Петрі. KPI Science News. 2021. С. 43-53.
4. Зайцев В. Г., Цибаєв Є.І. Модель оцінки часових характеристик у комп’ютерних системах реального часу з використанням сіток Петрі. *Управління розвитком складних систем*. 2019. № 40. С. 76-86.
5. Зайцев В.Г., Цибаєв Є.І. Оцінка часових характеристик задач в багатопроцесорних системах реального часу з використанням сіток Петрі. *Управління розвитком складних систем*. 2020. № 42. С. 43-50.

6. Using machine learning approaches for multi-omics data analysis: A review / P. S. Reel et al. *Biotechnology Advances*. 2021. Vol. 49. P. 107739. URL: <https://doi.org/10.1016/j.biotechadv.2021.107739> (date of access: 13.08.2023).
7. Karay M., Kostin A. Using extended Petri nets for modeling and simulation of queuing systems with priorities. *International Journal of Science and Advanced Technology*. 2014. № 4. P. 1–6.
8. Singh S. K., Jangid R., Singh G. P. On characterizing binary Petri Nets. *International Journal of System Assurance Engineering and Management*. 2023. URL: <https://doi.org/10.1007/s13198-023-01892-6> (date of access: 18.08.2023).
9. Yuan Feng-Lian, Huang Bo, Wang Ji-Peng, Pan Chun-Rong. A survey of modeling and scheduling of cluster tools based on Petri nets. *Acta Automatica Sinica*. 2023. № 49(5). P. 929–948 doi: 10.16383/j.aas.c210951
10. Bianco R. L., Dijkman R., Nuijten W., & van Jaarsveld W. Action-Evolution Petri Nets: A framework for modeling and solving dynamic task assignment problems. In *arXiv [cs.AI]*. 2023. <http://arxiv.org/abs/2306.02910>
11. Kaid Husam, Dabwan Abdulmajeed, Al-Ahmari Abdulrahman. Modeling and Simulation of Queuing Systems Using Stochastic Petri net and Arena Software: A Case Study. *8th International Conference on Industrial Engineering and Operations Management*. Bandung, Indonesia. 2018. P. 26–39.
12. Fonseca João, Sousa Alexandre, Tavares José. Modeling and controlling IoT-based devices' behavior with high-level Petri nets. *Procedia Computer Science*. 2023. № 217. P. 1462-1469. Doi: 10.1016/j.procs.2022.12.345.

Skillkov N.V. ANALYSIS OF TIME CHARACTERISTICS OF TASKS IN REAL-TIME COMPUTER SYSTEMS

This work considers the problems of determining the time characteristics of tasks in real-time computer systems. It is noted that in order to design a real-time system, it is necessary to solve a whole set of rather complex problems, which consist of the functional part, the selection of optimal technical means to solve the task, as well as the arrangement of previous problems into a single optimal real-time operating system. It is emphasized that solving a holistic problem consists of two directions, theoretical justification and modeling of implementation. Implementation methods are formed on the basis of static models and models built using Petri nets. It is emphasized that the development of models using the Petri net apparatus is based on the idea of dividing an analog value - the time of execution of a certain task on the processor into discrete quanta, which in turn are transmitted between positions in the Petri net as markers. A set of parameters of the real-time task was formed and the justification of the stage of dividing the task into subtasks was carried out. The task simulated on one of the processors is graphically presented, the set of transitions is described. A general modeling scheme is proposed for a more detailed understanding of the process. A task with a nested set of tasks with JSON markup is given. It is noted that the generator of the task queue, in turn, unpacks such a list of tasks into a "flat" list, where all three tasks are equal and enter the task manager in this form and have their own independent time characteristics. It is proved that due to the fact that the subtasks will be completed no later than their root task, it allows to operate them as independent tasks and to apply the proposed method of modeling multiprocessor systems to them.

Key words: multiprocessor system, modeling, method, time characteristic, task, subtask.

Соломчак О.В.

Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу

Николайчук М.Я.

Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу

Соломчак А.О.

Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу

АНАЛІЗ СТРАТЕГІЙ КЕРУВАННЯ СТАТКОМ В МЕРЕЖАХ З ВІТРОВИМИ ТА СОНЯЧНИМИ ЕЛЕКТРОСТАНЦІЯМИ

У статті розглянуто підходи, стратегії та алгоритми керування статичним компенсатором реактивної потужності (СТАТКОМ) в електричних мережах із вітровими та сонячними електростанціями. Проведено аналіз негативного впливу вітрових та сонячних електростанцій на електричну мережу: відхилення та коливання напруги, стійкість мережі, вищі гармоніки, якість електроенергії. На основі аналізу останніх досліджень та публікацій встановлено необхідність вдосконалення алгоритмів систем керування СТАТКОМ. Наведено переваги використання СТАТКОМ для стабілізації та покращення параметрів режимів електричних мереж, підвищення надійності та ефективності електропостачання: регулювання та стабілізація напруги, компенсація вищих гармонік, компенсація реактивної потужності. Розглянуто 4 стратегії керування СТАТКОМ: миттєве активно-реактивне керування, позитивно- та негативно-послідовний контроль, усереднене керування активними та реактивними компонентами, збалансоване керування з позитивною послідовністю. Після оцінки різних стратегій для визначення опорного струму в умовах незбалансованої мережі можна стверджувати, що основні проблеми при розрахунку опорного струму зосереджені на: величині коливань активної потужності, величині коливань реактивної потужності, гармонічному вмісті сигналу, що генерується. Показано, що стратегії, які досягають кращих результатів щодо здатності генерації потужності, це в основному ті, які генерують синусоїдальні струми. Однак ці види стратегії викликають коливання потужності, і лише для PNSC і AARC можна знайти окремі випадки, коли ці коливання відсутні. З іншого боку, IARC є найвигіднішою стратегією з точки зору керування потужністю, але, на жаль, дозволяє найменшу величину генерації потужності за незбалансованих умов, одночасно вводячи максимальну кількість гармонік серед представлених методів.

Ключові слова: СТАТКОМ, електрична мережа, сонячні електростанції, вітрові електростанції, якість напруги, стійкість, керування, моделювання режимів.

Постановка проблеми. Стрімкий розвиток сонячної та вітрової енергетики в Україні призвів до значного збільшення їх потужності та впливу на параметри режимів електричної мережі.

Це спричиняє наступні негативні наслідки: коливання напруги, підвищення/зниження напруги, проблеми зі стійкістю, необхідність регулювання напруги, проблеми інтеграції великої кількості сонячної та вітрової енергії в мережу.

Таким чином, хоча сонячна та вітрова енергія пропонують значні переваги для навколишнього середовища, їх нестійкий характер може викликати коливання напруги та проблеми зі стабільністю в електричній мережі. Ефективне управління електромережею, використання інтелектуальних технологій і належне планування інтеграції є важливими для забезпечення успіш-

ної інтеграції цих відновлюваних джерел, зберігаючи при цьому стабільне та надійне електропостачання.

Однією з перспективних технологій, які можуть забезпечити стабільність та рівень напруг у визначеному стандарті [1] рівні є Статичний компенсатор реактивної потужності (СТАТКОМ). Це пристрій, що використовується в електроенергетиці для управління реактивною потужністю в електричній мережі. Статичний компенсатор дозволяє компенсувати або керувати цією реактивною потужністю, щоб забезпечити стабільну напругу та ефективну роботу системи. СТАТКОМ може включати різні компоненти, такі як конденсатори та індуктивності (реактори), які можуть бути комутовані або регульовані залежно від поточних вимог мережі. Це допомагає знизити

втрати потужності, покращити якість електроенергії та підтримувати стабільну напругу.

Проте для використання в електричних мережах із сонячними та вітровими електростанціями необхідно вдосконалення алгоритмів систем керування СТАТКОМ.

Аналіз останніх досліджень і публікацій.

Ефективність і якість електроенергії визначається міжнародними стандартами IEC-61400-21 [2, 3] та IEC-61724-1 [4, 5], які чітко наголошують на стабільності системи у разі подачі електроенергії в мережу. Коли вітрова чи сонячна енергія подається в мережу, можливі різні дисбаланси, такі як просідання напруги, зростання напруги, мерехтіння та гармоніки, зміни напруги системи, частоти, активної та реактивної потужності. IEC 61400-21-2:2023 [3] визначає та конкретизує величини, які визначаються для характеристики електричних характеристик підключених до мережі електростанцій (ЕС). У дослідженні [6] аналізуються та порівнюються флікер-випромінювання, коливання напруги та механічні навантаження для двох невеликих вітрових турбін (WT) з урахуванням різних стратегій керування. Для оцінки флікер-емісії у роботі [7] запропоновано використовувати квадратичний показник. Цей показник був обраний на основі досліджень, проведених на ВЕС. Досліджено флікер-випромінювання окремого вітрогенератора та вітрової станції. У [8] запропонована модель процедури вимірювання коливань напруги мережевих вітрогенераторів. У статті розглядається тест перевірки процедури вимірювання мерехтіння та результати, продемонстровані шляхом моделювання відповідно до стандарту вимірювання та оцінки IEC-61400-21-1. У дослідженні [9] успішно впроваджено систему вимірювання флікеру напруги, яка може допомогти інженерам передбачити флікер напруги та оцінити, чи підходить регіон або мережа для встановлення вітрових турбін чи сонячних електростанцій. У статті [10] обговорюється комплексне керування системою вітрової турбіни, підключеної до промислового підприємства. Розроблено алгоритм, що дозволяє створити структуру керування, яка використовує інвертор, підключений до мережі, для введення балансуєної енергії, а також працювати як фільтр активної потужності та покращуючи якість електроенергії. Розглядається чотирипровідна система з трифазними і однофазними лінійними і нелінійними навантаженнями. Авторами [11] отримано умови симетрування навантажень за допомогою СТАТКОМ з використанням комплексних струму та провідності зво-

ротної послідовності навантаження. Досліджено помилки симетрування за різних статичних характеристик навантажень за напругою в разі керування за збуренням. В [12] досліджено вплив статичного синхронного компенсатора (СТАТКОМ) на показники якості електроенергії в мережах з несиметричним та нелінійним навантаженням.

Метою статті є аналіз існуючих підходів до вирішення питання та визначення задач вдосконалення алгоритмів систем керування статичними компенсаторами реактивної потужності в мережах із вітровими та сонячними електростанціями.

Виклад основного матеріалу. Конвертерна енергогенерація – це процес виробництва електроенергії за допомогою електронних пристроїв, таких як інвертори, конвертери та перетворювачі. Цей підхід зазвичай використовується для зміни форми, напруги або частоти електроенергії для відповідності потребам конкретних пристроїв чи систем. Одним з популярних методів конвертерної енергогенерації є використання сонячних панелей та інверторів для перетворення сонячної енергії в постійний струм для подальшого використання у домашніх або промислових системах. Крім того, конвертерна енергогенерація може бути використана для інших джерел відновлювальної енергії, таких як вітер та гідроенергія. Цей підхід також може бути використаний у системах зберігання енергії, де конвертери допомагають перетворити та зберегти енергію для подальшого використання. У різних галузях промисловості та технологій застосовуються різні типи конвертерів для оптимізації виробництва та ефективного використання енергії. Загалом, конвертерна енергогенерація є важливою складовою сучасних енергетичних технологій, спрямованих на підвищення ефективності та використання відновлювальних джерел енергії.

Важливо врахувати, що слабкі умови мережі перешкоджають інтеграції вітрових та сонячних електростанцій у мережу. Особливо мережі з низькою інерцією та великим опором мережі ставлять під сумнів можливість відповідності частоти та напруги. Це пояснюється низькою інерцією та слабким демпфуванням, які легко викликають небажані коливання в системі через динаміку мережі. Існує чітка кореляція між більшою кількістю конвертерного виробництва електроенергії та меншою інерцією системи.

СТАТКОМ (статичний компенсатор реактивної потужності) є електронним пристроєм, який використовується для керування реактивною потужністю в електричних мережах. Його осно-

вна функція полягає в компенсації реактивної потужності, зокрема виправлення фазового зсуву між струмом і напругою, що сприяє підвищенню ефективності енергосистеми.

Використання СТАТКОМ в електричних мережах має кілька переваг. По-перше, він забезпечує зниження споживання електроенергії і покращує коефіцієнт потужності, що призводить до економії енергоресурсів і зменшення втрат електричної енергії. Це особливо корисно для промислових підприємств, де споживання електроенергії є значним.

По-друге, використання СТАТКОМ допомагає підтримувати стабільну напругу в електричній мережі, запобігаючи перепадам напруги та зниженню якості електропостачання. Це важливо для багатьох сфер, включаючи індустрію, комерційні будівлі та житлові комплекси, де надійне та стабільне електропостачання є критичним фактором.

Крім того, СТАТКОМ є гнучким у використанні, оскільки може бути налаштований для автоматичного керування реактивною потужністю в залежності від потреб системи. Він може працювати як в режимі реактивної компенсації, так і в режимі гармонічних фільтрів, покращуючи якість електричної енергії та зменшуючи спотворення.

Застосування СТАТКОМ в електричних мережах із вітровими та сонячними електростанціями може бути корисним для керування реактивною потужністю та покращення ефективності енергосистеми.

Основні методи використання СТАТКОМ в таких системах включають наступне:

Компенсація реактивної потужності. Використання СТАТКОМ дозволяє активно керувати реактивною потужністю, забезпечуючи компенсацію надлишкової або недостатньої реактивної потужності, що допомагає збалансувати систему та знизити втрати електроенергії.

Регулювання напруги. Вітрові та сонячні електростанції можуть впливати на рівень напруги в електричній мережі через зміну виробництва електроенергії. Використання СТАТКОМ дозволяє контролювати рівень напруги шляхом компенсації реактивної потужності та підтримувати стабільну напругу в системі.

Компенсація гармонік. Вітрові та сонячні електростанції можуть спричиняти гармоніки в електричній мережі, що може впливати на якість електропостачання. СТАТКОМ може використовуватись для фільтрації гармонік та зменшення їх впливу на систему, покращуючи якість електричної енергії.

Підтримка стабільності мережі. Сонячні та вітрові електростанції можуть впливати на стабільність електричної мережі через зміну вироб-

ництва електроенергії. Використання СТАТКОМ допомагає збалансувати потужність і реактивну потужність, підтримуючи стабільність мережі та запобігаючи можливим проблемам, пов'язаним зі змінним виробництвом електроенергії.

Всі ці застосування СТАТКОМ допомагають підвищити ефективність використання вітрової та сонячної енергії, забезпечуючи стабільне та якісне електропостачання. Враховуючи зростання використання сонячної та вітрової енергії, СТАТКОМ може бути важливим компонентом управління та оптимізації електричних мереж.

В дослідженні [13, с. 5211–5216] проведено оцінку реактивної потужності вітрових турбін під час роботи в двох режимах: нормальна робота та провал напруги. У цьому дослідженні розглядаються вітрові турбіни вітрові турбіни зі змінною швидкістю (ВТЗШ), вітрові турбіни зі сталою швидкістю (ВТСШ) з батареєю конденсаторів і ВТСШ зі СТАТКОМ. Це дослідження вказує на те, які типи вітряних турбін слід використовувати з точки зору можливостей підтримки реактивної потужності, і може допомогти операторам енергосистем визначити кількість реактивної потужності, яку можуть підтримувати вітрові електростанції. Використання СТАТКОМ підвищує продуктивність ВТСШ у регулюванні реактивної потужності, оскільки він може генерувати або споживати реактивну потужність. ВТСШ зі СТАТКОМ здатний отримувати більше реактивної потужності, ніж він може постачати в мережу, і його діапазон споживання завжди більший, ніж діапазон його генерації. У випадку низької напруги ВТСШ із встановленим СТАТКОМ може підтримувати найвищу реактивну потужність в мережу, якщо потужність СТАТКОМ співрозмірна з потужністю вітрової турбіни. Для швидкого реагування на зміни напруги в мережі в аварійних режимах необхідні відповідні алгоритми роботи СТАТКОМ.

В плані підвищення надійності та стабільності електричних мереж є стратегія керування на базі формування сітки (СКФС) – це метод управління електроенергетичними системами, який дозволяє створювати внутрішню сіткову структуру в розподільчих чи магістральних мережах. Цей підхід особливо важливий у випадках, коли відсутність сталого зв'язку з основною електричною мережею, або коли система повинна відновлювати свою роботу після відключень або інших збурень.

Головною ідеєю СКФС є створення в силовій мережі «сіткового ефекту», подібного до того, який існує у звичайних генеруючих системах.

Це допомагає підтримувати стабільну напругу та частоту у мережі, навіть коли генератори або споживачі від'єднані від центральної мережі.

Стратегія СКФС використовує різні методи керування, такі як динамічне розподіл навантаження, координація між різними джерелами виробництва енергії (сонячні панелі, вітрові турбіни, акумулятори тощо) та адаптація до зміни умов. Вона базується на розумному алгоритмі керування, який враховує різні параметри системи та забезпечує її ефективну роботу. Застосування стратегії СКФС може допомогти підвищити надійність та стійкість електромережі, зменшити вплив відключень на споживачів та сприяти інтеграції відновлювальних джерел енергії.

З точки зору використання СТАТКОМ можливі 4 стратегії керування:

1. Миттєве активно-реактивне керування (Instantaneous Active-Reactive Control (IARC)).

Миттєвий активно-реактивний контроль є технічною стратегією керування енергією, що використовується в електроенергетичних системах для підтримки стабільності, зниження втрат енергії та оптимізації роботи електричних мереж. Цей метод включає в себе миттєве реагування на зміни в споживанні електроенергії та інших факторах, що можуть впливати на стан системи.

IARC дозволяє регулювати як активну, так і реактивну потужність в електричній мережі, забезпечуючи баланс між виробництвом та споживанням енергії. Це може бути досягнуто шляхом керування параметрами, такими як напруга, струм, фазові кути тощо. IARC використовується для підтримки якісної постачання електроенергії та уникнення перевантажень чи нестабільності в електромережі.

Ця стратегія є важливою для забезпечення ефективності та надійності роботи електроенергетичних систем, особливо в умовах зростаючого попиту на електроенергію та використання відновлюваних джерел енергії.

Миттєва активна потужність p , що генерується, або споживається підключеним до мережі трифазним перетворювачем потужності, може бути розрахована як

$$p = v \cdot i, \quad (1)$$

де $v = (v_a, v_b, v_c)$ – вектор напруги в точці спільного приєднання, $i = (i_a, i_b, i_c)$ – вектор струму, що генерується в таку точку, а « \cdot » являє собою скалярний добуток обох векторів.

Миттєва реактивна потужність q , що генерується перетворювачем потужності, внаслідок взаємодії між вектором струму та загальним вектором напруги v , може бути записана як

$$q = |v \times i|. \quad (2)$$

Миттєва реактивна потужність може бути визначена як модуль векторного добутку між v та i . Однак миттєву реактивну потужність також можна розрахувати за допомогою наступного скалярного добутку:

$$q = v_T \times i, \quad (3)$$

де v_T є ортогональною версією (з випередженням 90°) вихідного вектора напруги мережі v .

З огляду на рівняння (1) і (3) будь-який вектор струму, узгоджений з вектором напруги v , призведе до активної потужності, тоді як будь-який вектор струму, узгоджений з v_T генеруватиме реактивну потужність. Ця концепція може бути представлена наступними виразами, які складають основу стратегії миттєвого активно-реактивного керування IARC для визначення опорних струмів:

$$i_p^* = g \cdot v; \quad (4)$$

$$i_q^* = b \cdot v_T, \quad (5)$$

де i_p^* та i_q^* можна розглядати як вектори активного і реактивного струмів відповідно, g та b активна та реактивна провідності, обидві дійсні величини, які встановлюють пропорцію між векторами напруги і струму.

2. Позитивно- та негативно-послідовний контроль (Positive- and Negative-Sequence Control (PNSC)).

Метод керування в системах електропостачання, особливо в контексті контролю над послідовними компонентами струму або напруги.

Позитивно-послідовний контроль визначає реакцію системи на позитивний послідовний компонент струму чи напруги, який зазвичай виникає внаслідок несиметричних подій у системі, таких як короткі замикання. Негативно-послідовний контроль відповідає за негативний послідовний компонент і може бути важливим для виявлення асиметрій і неузгодженостей в електричних мережах.

Позитивно- та негативно-послідовний контроль є важливими з точки зору забезпечення стійкості та надійності електроенергетичних систем. Цей метод дозволяє швидко виявляти і реагувати на відхилення, зменшуючи можливість пошкоджень обладнання та забезпечуючи безперебійне живлення споживачів.

3. Усереднене керування активними та реактивними компонентами (Average Active-Reactive Control (AARC)).

Метод керування енергією в електричних мережах, який дозволяє підтримувати стабільний рівень напруги та керувати потоками електроенергії, зокрема активною та реактивною потужностями.

AARC зазвичай використовується в електроенергетичних системах для оптимізації використання електроенергії та забезпечення ефективності та стабільності електричних мереж. Цей метод може включати в себе такі елементи, як автоматичні регулятори напруги, реактивні компенсатори, а також спеціальні алгоритми керування, які допомагають підтримувати оптимальний баланс між активними та реактивними потужностями.

Застосування AARC дозволяє зменшити втрати енергії, підвищити ефективність роботи системи та забезпечити стабільну якість електропостачання.

4. Збалансоване керування з позитивною послідовністю (Balanced Positive-Sequence Control (BPSC)).

Метод керування електричними системами, який спрямований на підтримання балансу між фазами в системі змінного струму. Цей метод використовується в електроенергетичних системах для забезпечення стабільності напруги та струму в трьох фазах.

BPSC допомагає вирівнювати амплітуди та фазові кути струмів і напруг у системі, забезпечуючи більш ефективну та надійну роботу електричної мережі. Це особливо важливо в ситуаціях, коли виникають дисбаланси через зміни навантаження або інші фактори.

BPSC може бути реалізований за допомогою різних керуючих алгоритмів та обладнання, таких як контролери реактивної потужності, регулятори напруги та інші системи автоматичного керування. Використання BPSC допомагає зменшити втрати електроенергії, поліпшити якість електропостачання та забезпечити стабільну роботу системи.

Цей метод є важливою складовою сучасних електроенергетичних систем і допомагає забезпечити ефективну та надійну роботу електричних мереж.

Для порівняння стратегій керування розглянемо умовну схему мережі з вітровою електростанцією та СТАКОМ (рис. 1).

У системі, зображеній на рис. 1, збурення виникає в електричній мережі з ВЕС, до якої підключено СТАКОМ. Опорні струми для СТАКОМ, визначені стратегіями IARC, PNSC, AARC і BPSC за таких умов перехідного процесу в мережі, представлені нижче. Оскільки в цьому простому прикладі інтерес представляють лише показники еталонних струмів, припускається, що потужність збурення в точці з'єднання набагато вища, ніж реактивна потужність, подана СТАКОМ. Таким чином, передбачається, що на напругу в точці з'єднання практично не впливає струм, введений СТАКОМ.

Результати, отримані за допомогою чотирьох стратегій керування [14], показані на рис. 2. Незбалансовані напруги мережі показані на рис. 2 (а). На наступних двох графіках, рис. 2 (b) і (c), миттєва активна та реактивна потужності генеровані в мережу. Нарешті, форми струму, отримані за допомогою кожної стратегії керування, зображені на рис.(d).

В проміжку часу від $t = 0$ і $t = 40$ мс застосовується стратегія IARC, що призводить до рівних миттєвих активних і реактивних потужностей, тоді як отримані струми сильно спотворені. Після $t = 40$ мс вмикається стратегія PNSC. У цьому випадку опорні струми складаються з набору незбалансованих трифазних сигналів, але без гар-

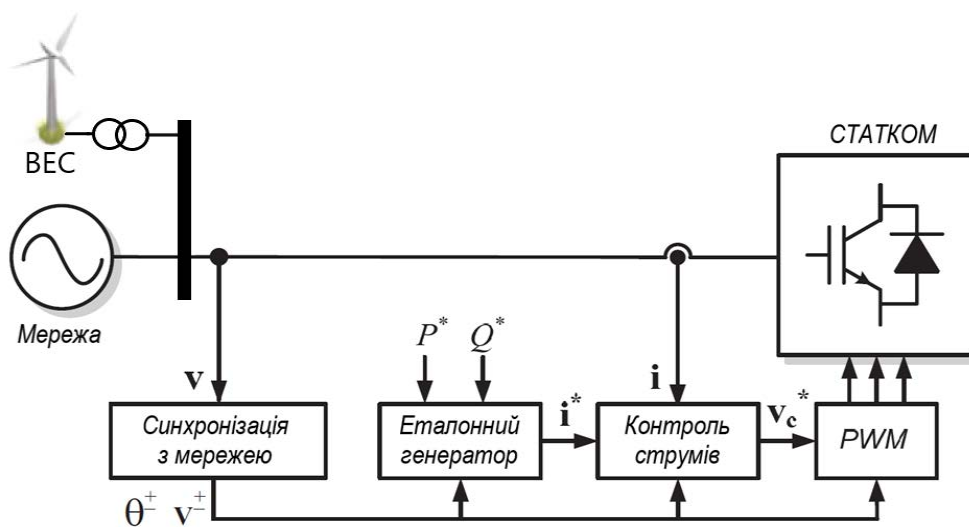


Рис. 1. Приклад схеми мережі зі СТАКОМ

монійних спотворень, як і очікувалося. Що стосується поведінки потужності, доведено, що реактивна потужність залишається постійною, тоді як активна потужність представляє коливання навколо нульового середнього значення.

Від $t = 80$ мс до $t = 120$ мс генератор опорного струму реалізує стратегію AARC. Як видно з рисунку, отримані струми знову синусоїдальні. Крім того, максимальна амплітуда цих струмів нижча, ніж отримана за стратегіями IARC і PNSC, зберігаючи те саме значення Q . Ця особливість вказує на те, що за допомогою AARC можна досягнути більш високого значення реактивної потужності, що вводиться в мережу за незбалансованих умов, що є значною перевагою. Крім того, миттєва активна потужність, споживана стратегією AARC, не містить коливань, що зменшує коливання напруги на шині постійного струму СТАТКОМ.

Нарешті, поведінка BPSC зображена в кінці графіків моделювання, від $t = 120$ мс до $t = 160$ мс. У цьому випадку, оскільки в мережу не вводяться компоненти зворотної послідовності, виникають коливання як активної, так і реактивної потужності. Однак ця техніка ще більше покращує переваги AARC щодо зменшення максимального струму. З рис.2. можна стверджувати, що BPSC є тим, який дає найнижче пікове значення генерованого струму серед усіх чотирьох порівнюваних стратегій, одночасно вводючи однакове середнє задане значення реактивної потужності.

Після оцінки різних стратегій для визначення опорного струму в умовах незбалансованої мережі можна стверджувати, що основні проблеми при розрахунку опорного струму зосереджені на:

- величині коливань активної потужності,
- величині коливань реактивної потужності,
- гармонічний вміст сигналу, що генерується.

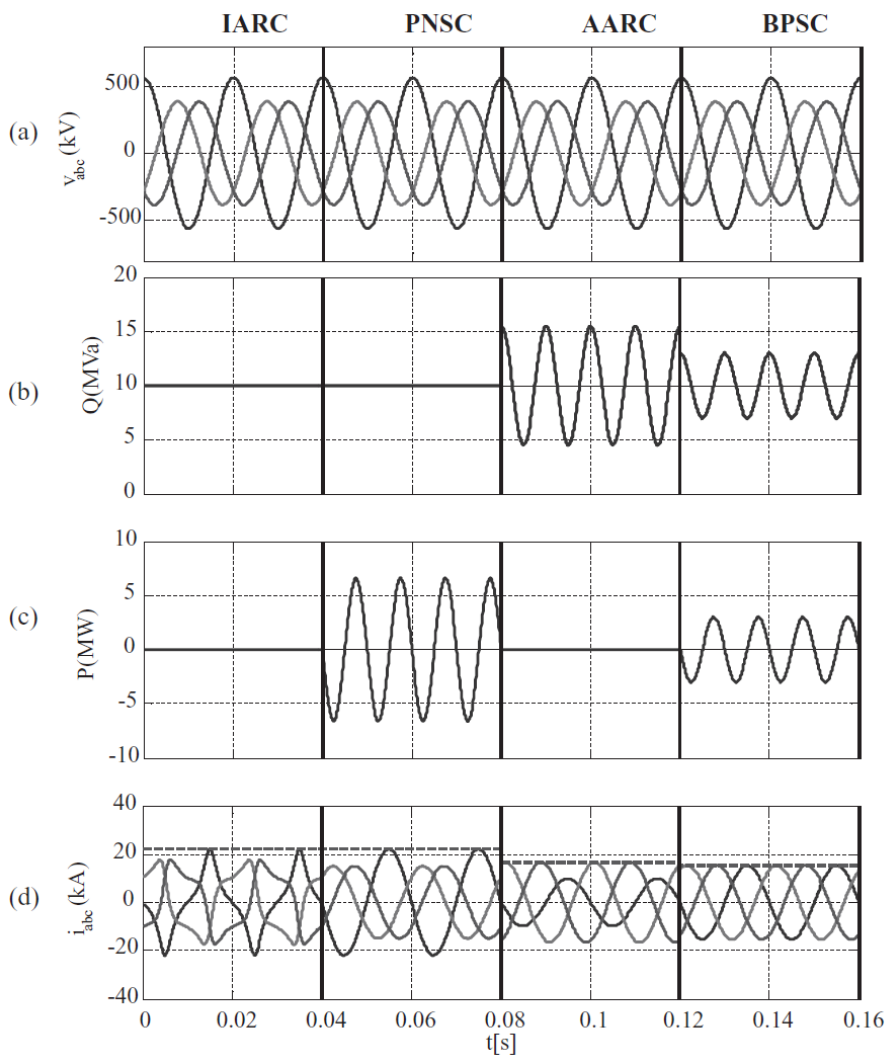


Рис. 2. Миттєві величини параметрів мережі при різних стратегіях керування

З представленою аналізу можна зробити висновок, що стратегії, які досягають кращих результатів щодо здатності генерації потужності, це в основному ті, які генерують синусоїдальні струми. Однак ці види стратегії викликають коливання потужності, і лише для PNSC і AARC можна знайти окремі випадки, коли ці коливання відсутні. З іншого боку, IARC є найвигіднішою стратегією з точки зору керованості потужністю, але, на жаль, дозволяє найменшу величину генерації потужності за незбалансованих умов, одночасно вводячи максимальну кількість гармонік серед представлених методів.

Алгоритм керування СТАТКОМ для стабілізації напруги в електричній мережі із сонячними та вітровими електростанціями повинен бути розроблений з урахуванням особливостей системи та поставлених цілей. Основною метою алгоритму є підтримання стабільного рівня напруги в електричній мережі шляхом контролю реактивної потужності.

Основні кроки алгоритму керування СТАТКОМ для стабілізації напруги можуть включати:

- **Моніторинг напруги:** Система має постійно моніторити рівень напруги в електричній мережі. Це може відбуватись за допомогою давачів, які вимірюють напругу на відповідних точках системи.
- **Визначення потреби в реактивній потужності:** Алгоритм повинен визначати, чи необ-

хідно додатково генерувати або споживати реактивну потужність для підтримки стабільного рівня напруги. Це може виконуватись на основі порівняння фактичного рівня напруги з заданим допустимим діапазоном.

- **Керування реактивною потужністю:** Залежно від визначеної потреби в реактивній потужності, алгоритм повинен встановлювати відповідне керування СТАТКОМ. Це може бути зміна кута зсуву фази, регулювання реактивного опору або використання інших методів керування, доступних у конкретній системі.

- **Постійна перевірка та корекція:** Алгоритм повинен постійно перевіряти рівень напруги та реактивної потужності і, у разі необхідності, коригувати керування СТАТКОМ для підтримки стабільної напруги.

Висновки. У даному дослідженні розглянуто підходи та стратегії керування СТАТКОМ в мережах із вітровими та сонячними електростанціями, що дозволяють розробити алгоритм керування, який буде ефективним, швидким і точним у реагуванні на зміни у системі.

При розробці кінцевих алгоритмів потрібно враховувати фактори, такі як максимальні обмеження реактивної потужності та безпекові аспекти, щоб забезпечити надійну та стабільну роботу електричної мережі з вітровим генератором чи сонячною електростанцією.

Список літератури:

1. ДСТУ EN 50160:2014 (EN 50160:2010, IDT) Національний стандарт України. Характеристики напруги електропостачання в електричних мережах загальної призначеності.
2. IEC 61400-21-1:2019 – Wind energy generation systems – Part 21-1: Measurement and assessment of electrical characteristics – Wind turbines. 298 p.
3. IEC 61400-21-2:2023 – Wind energy generation systems – Part 21-2: Measurement and assessment of electrical characteristics – Wind power plants. 151 p.
4. IEC 61724-1:2021 – Photovoltaic system performance – Part 1: Monitoring. 136 p.
5. IEC 61724-2:2016 – Photovoltaic system performance – Part 2: Capacity evaluation method. 27 p.
6. Ebrahim Mohammadi, Roohollah Fadaeinedjad, Hamid Reza Najji. Flicker emission, voltage fluctuations, and mechanical loads for small-scale stall- and yaw-controlled wind turbines. Energy Conversion and Management. Volume 165, 2018, p. 567-577. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2018.03.094>.
7. Redondo K, Gutierrez J J, Azcarate I, Saiz P, Leturiondo L A, S Ruiz de Gauna (2019) Experimental Study of the Summation of Flicker Caused by Wind Turbines. Energies. 12(12):2404. <https://doi.org/10.3390/en12122404>
8. Khan, Noman, Usman Farooq, Xiongfei Wang, Lars Helle, Pooya Davari. (2018) Evaluation of Flicker Measurement in Grid-connected Wind Turbine. In: IEEE PES Asia-Pacific Power and Energy Engineering Conference (APPEEC), pp. 633-639. IEEE.
9. Wang, Chau-Shing et al. Enhancement of the Flickermeter for Grid-Connected Wind Turbines. Energies (2021): n. pag. <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:239172379>
10. Bubshait, A.S., Mortezaei, A., Simoes, M., & Busarello, T.D. (2017). Power Quality Enhancement for a Grid Connected Wind Turbine Energy System. IEEE Transactions on Industry Applications, 53, 2495-2505.
11. Бурбело М. Й. Умови симетрування електричних навантажень розподільних мереж за допомогою СТАТКОМ / М. Й. Бурбело, Ю. П. Войтюк, Ю. В. Лобода // Вісник Вінницького політехнічного інституту. – 2016. – № 2. – С. 139–144. – ISSN 1997-9266.

12. О. Р. Лещенко, Ю. В. Лобода, М. Й. Бурбело, «Застосування статком для підвищення якості електроенергії», Матеріали XLIX науково-технічної конференції підрозділів ВНТУ, Вінниця, 27-28 квітня 2020 р.
13. P. D. Chung, “Evaluation of Reactive Power Support Capability of Wind Turbines”, Eng. Technol. Appl. Sci. Res., vol. 10, no. 1, pp. 5211–5216, Feb. 2020.
14. Grid Converters for Photovoltaic and Wind Power Systems. Remus Teodorescu, Marco Liserre and Pedro Rodriguez. 2011. John Wiley & Sons, Ltd. ISBN: 978-0-470-05751-3

Solomchak O.V., Nykolaychuk M.Ya., Solomchak A.O. ANALYSIS OF CONTROL STRATEGIES OF STATCOM IN POWER GRID WITH WIND AND SOLAR POWER PLANTS

The article deals with approaches, strategies and algorithms for controlling static reactive power compensator (STATKOM) in electrical networks with wind and solar power plants. An analysis of the negative impact of wind and solar power plants on the electrical network was carried out: voltage deviations and fluctuations, network stability, higher harmonics, power quality. Based on the analysis of the latest research and publications, the need to improve the algorithms of STATCOM control systems has been established. The advantages of using STATCOM to stabilize and improve the parameters of electric network modes, increase the reliability and efficiency of power supply: regulation and stabilization of voltage, compensation of higher harmonics, compensation of reactive power are given. Four STATCOM control strategies are considered: Instantaneous Active-Reactive Control (IARC), Positive- and Negative-Sequence Control (PNSC), Averaged control of active and reactive components (Average Active- Reactive Control (AARC), Balanced Positive-Sequence Control (BPSC). After evaluating various strategies for determining the reference current in the conditions of an unbalanced network, it can be stated that the main problems in calculating the reference current are focused on: the magnitude of active power fluctuations, the magnitude of reactive power fluctuations, and the harmonic content of the generated signal. It is shown that the strategies that achieve the best results in terms of power generation ability are mainly those that generate sinusoidal currents. However, these kinds of strategies cause fluctuations in power, and only for PNSC and AARC can we find isolated cases where these fluctuations are absent. On the other hand, IARC is the most advantageous strategy in terms of power controllability, but unfortunately allows the lowest amount of power generation under unbalanced conditions while introducing the maximum number of harmonics among the methods presented.

Key words: STATKOM, electrical network, solar power plants, wind power plants, voltage quality, stability, control, mode modeling.

Стаценко Д.В.

Київський національний університет технологій та дизайну

Стаценко В.В.

Київський національний університет технологій та дизайну

Злотенко Б.М.

Київський національний університет технологій та дизайну

Демішонкова С.А.

Київський національний університет технологій та дизайну

ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОГРАМ НА ОСНОВІ ШТУЧНОГО ІНТЕЛЕКТУ В ЯКОСТІ КОМП'ЮТЕРНИХ ЗАСОБІВ ЗАХИСТУ ІНФОРМАЦІЇ

У роботі проведено дослідження застосування штучного інтелекту та машинного навчання, для удосконалення комп'ютерних систем аналізу та захисту від кіберзагроз. Зауважено, що за останні роки відбувається удосконалення та розробка нових типів шкідливого програмного забезпечення, в зв'язку з чим продовження використання традиційних систем захисту сьогодні – неефективно. Аналіз літератури показав, що глобальна вартість відновлення після типових порушень даних становить понад 4,45 мільйонів доларів США. Це вказує на необхідність додаткового удосконалення систем захисту із залученням технологій штучного інтелекту, з метою зниження додаткових витрати часу та ресурсів.

У статті запропоновано використання програм на основі штучного інтелекту для визначення та виявлення загроз з використанням машинного навчання для адаптації та передбачення появи нового або модифікації існуючого шкідливого програмного забезпечення.

Зауважено, що використання машинного навчання підвищує можливості автоматизації систем кібербезпеки та точності виявлення загроз. Штучний інтелект може збільшити кількість можливостей по визначенню загроз та попередження фахівців системи захисту про виявлення та блокування потенційного шкідливого програмного забезпечення.

В результаті проведеного дослідження представлено, що визначення загроз на основі штучного інтелекту підвищує ефективність та якість програм комп'ютерних систем захисту. Наведено моделі використання штучного інтелекту, які вказують на те, що покращується технологія виявлення фішингу та шкідливих програм. Продемонстровано, що алгоритми машинного навчання можуть призвести до підвищення результативності визначення закономірностей та інших аномалій, що вказує на потенційні кіберзагрози. Проведення аналізу закономірностей та аномалій в даних, моделі штучного інтелекту можуть виявити й позначити потенційне шкідливе програмне забезпечення, додаючи нові можливості для систем кібербезпеки.

Ключові слова: штучний інтелект, машинне навчання, кібербезпека, захист інформації, шкідливе програмне забезпечення.

Постановка проблеми. Сьогодні все більше повсякденних процесів потребує використання нових цифрових систем, однак при цьому складність і удосконаленість кіберзагроз, з якими стикається людство, зростає. Традиційні заходи захисту цифрової безпеки стикаються з дедалі більшими труднощами та потребують постійного оновлення, щоб не відставати від цих загроз. Це призводить до необхідності в додаткових дослідженнях пов'язаних з більш досконалішими і адаптивними рішеннями, такими як штучний інтелект (ШІ) і машинне навчання (МН) [1].

Штучний інтелект має можливість вчитися на основі отриманих даних і при цьому робити прогнози, що може позитивно вплинути на покращення кіберзахисту. МН, як підмножина ШІ, продемонструвало значний потенціал у покращенні виявлення кіберзагроз і реагування на них. Однак, незважаючи на це, застосування МН в кібербезпеці відноситься до нової сфери, яка потребує подальшого вивчення та розуміння [2].

Представлена робота спрямоване на дослідження штучного інтелекту та машинного

навчання в кібербезпеці з оглядом методів, які використовуються для аналізу загроз.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Кількість досліджень, пов'язаних із застосування штучного інтелекту в кібербезпеці, за останні роки збільшилось. Комплексні дослідження, щодо поточних застосувань штучного інтелекту в кібербезпеці, показали детальну статистику та розподіл робот пов'язаних з цим, також проводяться обговорення майбутніх напрямків досліджень. Дослідження надають детальне уявлення про кібербезпеку, керовану ШІ, з точки зору принципів і методів моделювання для інтелектуальних і автоматизованих служб пов'язаних з кібербезпекою. Незважаючи на перспективні розробки ШІ в кібербезпеці, потреба в подальших дослідженнях доцільна [3].

Крім того, розвиток Інтернету речей (IoT) розширив зону атаки для кіберзлочинців, що зумовило необхідність більш надійних і комплексних рішень безпеки. Програми кібербезпеки зараз розробляються з урахуванням безпеки Інтернету речей, забезпечуючи захист широкого кола пристроїв і мереж. Незважаючи на ці досягнення, сфера кібербезпеки продовжує стикатися зі значними проблемами. Зростаюча складність і масштаб кіберзагроз вимагають постійних інновацій і розвитку програм кібербезпеки. Штучний інтелект може значно покращити автоматичне реагування на інциденти, виявлення фішингу та виявлення шкідливих програм у сфері кібербезпеки [4].

У контексті освіти, систематичний огляд літератури масових відкритих онлайн-курсів (МВОК) з кібербезпеки показав, що існує потреба викладати ШІ та кібербезпеку разом. За даними IBM, з 2020 по 2023 рік вартість витоку даних зросла на 13,25% з 3,86 мільйона доларів до 4,45 мільйона доларів [5, 6]. Це вказує на необхідність додаткового удосконалення у ШІ, з метою зниження додаткових витрати часу та ресурсів.

Незважаючи на те, що штучний інтелект і машинне навчання демонструють потенціал у покращенні виявлення загроз і реагування на них, кількість досліджень присвячених цьому аспекту не є достатньою.

Метою статті є аналіз програм на основі штучного інтелекту та машинного навчання для використання в кібербезпеці для захисту інформації, а також механізмів аналізу загроз, які при цьому використовуються.

Виклад основного матеріалу. Штучний інтелект (ШІ) – це галузь інформатики, яка спрямована на створення систем, здатних виконувати

завдання, які зазвичай потребують використання моделі людського інтелекту [7]. До цих завдань відноситься навчання та адаптація нової інформації, розуміння людської мови, розпізнавання моделей поведінки і прийняття рішень. Загалом ШІ розділяється на типи: 1) вузький ШІ, призначений для виконання конкретного завдання; 2) загальний ШІ – може розуміти, вивчати та застосовувати знання в широкому діапазоні завдань.

Кібербезпека передбачає захист комп'ютерних систем і мереж від розголошення інформації, крадіжки або її зміни (шифрування), захисту апаратного, програмного забезпечення, електронних даних, а також від порушення або неправильного спрямування послуг. ШІ може автоматизувати процес виявлення загроз і реагування на них, збільшуючи швидкість і ефективність. Він може вчитися, використовуючи для цього інформацію про минулі інциденти, визначати закономірності та передбачати майбутні загрози.

ШІ обробляє великі масиви даних на високій швидкості, що дозволяє виявляти загрози та реагувати на них у режимі реального часу. Адаптування до нових загроз дозволяє підвищити ефективність, в порівнянні з традиційними методами, які засновані на використанні бази відомих сигнатур загроз. Вищенаведене, у свою чергу, потенційно зменшить навантаження на фахівців з кібербезпеки, автоматизуючи базові та стандартні завдання, дозволяючи зосередитися лише на складних питаннях.

Однак використання штучного інтелекту в кібербезпеці також має проблеми. Однією з проблем є ризик помилкових спрацьовувань, коли законні дії помилково визначаються та ідентифікуються, як загрози, що призведе до непотрібних дій програм захисту і збоїв. Іншою проблемою є ризик маніпуляції або атаки зловмисників на системи штучного інтелекту. Відповідно забезпечення безпеки та цілісності систем ШІ є важливою проблемою. Також, при використанні штучного інтелекту в кібербезпеці необхідно розглядати питання етики та конфіденційності особистих даних користувачів, обробка яких виконується на різних етапах роботи систем захисту ШІ.

Машинне навчання (МН) – це підмножина ШІ, яка надає системам можливість автоматично навчатися та вдосконалюватися на основі досвіду без явного програмування [4, 8]. Він зосереджений на розробці програмного забезпечення, яке може отримувати доступ до даних і використовувати їх для самостійного навчання. Процес навчання включає такі елементи: 1) спостереження; 2) дані;

3) прямий досвід; 4) інструкції. Ці елементи дозволяють шукати закономірності в даних і приймати кращі рішення в майбутньому на основі прикладів, які надаються фахівцями з кібербезпеки.

У сфері кібербезпеки МН, завдяки своїй здатності швидко аналізувати величезні обсяги даних і виявляти аномалії, використовується для автоматизації виявлення загроз і боротьби з ними без втручання людини, таким чином скорочуючи час реакції та потенційно зменшуючи вплив загрози. МН також можна використовувати для прогнозування майбутніх загроз на основі раніше отриманих даних. Цей механізм орієнтований на дані намагається кількісно оцінити кіберризик, просуває методи висновку для аналізу моделей поведінки, зосереджується на створенні сповіщень про реакцію безпеки та оптимізує операції з кібербезпеки.

Нижче наведено декілька прикладів, які демонструють успішне впровадження МН у кібербезпеку. Компанія з кібербезпеки CrowdStrike використовує МН для автоматичного виявлення загроз і реагування на них. Їхні алгоритми МН аналізують дані з мільйонів систем у всьому світі, щоб ідентифікувати та блокувати потенційні загрози в реальному часі. Інший приклад є промислове застосування МН для захисту від кіберзагроз [8].

На основі загального потоку таких реалізацій представлення багаторівневої інтегрованої структури для машинного навчання в інтелектуальних службах кібербезпеки може працювати відповідно до описаного нижче, що включає в себе різні етапи обробки, від вихідних даних подій безпеки до кінцевих служб.

Загалом, потік може починатися з необроблених даних подій безпеки зібраних з різних джерел. Наступний етап передбачає підготовку цих даних та попередньої обробки для обробки алгоритмами машинного навчання. Далі відбувається застосування методів машинного навчання до цих даних, де модель вчиться ідентифікувати шаблони та аномалії, які можуть вказувати на потенційні загрози. Модуль постобробки та вдосконалення, який спрощує отримані знання відповідно до конкретних вимог шляхом включення предметно-специфічних знань. Далі йде модуль аналізу актуальності та оновлення моделі безпеки, який підтримує актуальність моделі безпеки шляхом завантаження найновіших шаблонів безпеки, керованих даними.

Останній модуль планування реагування та прийняття рішень, який приймає рішення на основі отриманої інформації та вживає необхідних заходів для запобігання системі від кібератак.

Машинне навчання в кібербезпеці також використовується для класифікації. Ця технологія забезпечує прогнозування зловмисності певного зразка з оцінкою впевненості. Ефективність цих моделей оцінюється на основі двох критеріїв: точності і результату. Позитивне виявлення від класифікатора зловмисного програмного забезпечення вказує на те, що модель передбачає зловмисний зразок на основі ознак, пов'язаних із відомими зловмисними зразками.

Розглянемо моделі, навчені аналізувати шкідливі файли. Справжній позитивний результат означає, що модель правильно визначила файл як шкідливий. Справжній негатив означає, що модель правильно визначила файл як нешкідливий. Помилковий результат означає, що модель неправильно визначила нешкідливий файл як шкідливий. Помилковий негатив означає, що модель неправильно визначила шкідливий файл як нешкідливий. Хоча справжні спрацьовування мають вирішальне значення для виявлення загроз і реагування на них, помилкові спрацьовування також є важливим показником ефективності. Помилкові спрацьовування негативно впливають на роботу всієї системи захисту, оскільки вони вимагають витратити час і ресурси на дослідження кожного виявлення та можуть порушити роботу критичних програм при запуску автоматичних програм відновлення.

Під час коригування моделі системи захисту даних потрібно збалансувати показники справжніх і хибних позитивних результатів. Зниження порогу для справжніх позитивних результатів може збільшити кількість помилкових позитивних результатів, що призведе до втрати продуктивності. Метою розробки високопродуктивних моделей машинного навчання є максимізація ефективності виявлення шляхом збільшення справжніх позитивних виявлень і зменшення помилкових спрацьовувань. Цей баланс може бути складним, оскільки класифікатори зловмисного програмного забезпечення часто мають справжні позитивні показники близько 99%, збалансовані проти помилкових позитивних показників значно нижче 1%.

Таблиця 1

Помилкові позитивні та помилкові негативні результати

Передбачені значення	Справжні значення	
	Позитивні	Негативні
Позитивні	Справжні позитивні	Помилкові позитивні
Негативні	Помилкові негативні	Справжні негативні

Наступним етапом є розвідка загроз – збір і аналіз інформації про потенційні або поточні атаки, які загрожують організації. Концепція аналізу загроз передбачає аналіз та інтерпретацію даних для виявлення загроз, пошуку прогнозних індикаторів і впровадження захисних заходів. Роль штучного інтелекту в розвідці загроз полягає в автоматизації процесу збору, зберігання та аналізу даних.

Розвідка загроз на основі ШІ використовує машинне навчання та інші методи штучного інтелекту для аналізу шаблонів і виявлення аномалій, які вказують на потенційні загрози.

Для виявлення загроз сьогодні використовуються наступні бібліотеки штучного інтелекту та методів кодування. Scikit-learn, TensorFlow та PyTorch пропонують готові функції та інструменти для створення моделей машинного навчання. Ці бібліотеки можна використовувати для реалізації різних алгоритмів машинного навчання для виявлення загроз, наприклад випадковий ліс, дерево рішень та нейронні мережі.

Практики кодування також відіграють важливу роль у впровадженні аналізу загроз на основі ШІ. Перегляд коду, модульне тестування та постійна інтеграція, збільшує якість і надійність моделей ШІ.

Сьогодні використовується декілька наборів даних у сфері кібербезпеки, таких як NSL-KDD, DARPA, CAIDA, MAWI, ADFA IDS, CERT, EnronSpam, SpamAssassin, Malware Genome project, Virus Share, VirusTotal, Comodo, Contagio, Microsoft тощо. Дані набори даних містять приклади різних типів кібератак і можуть використовуватися для навчання та тестування продуктивності систем аналізу загроз з ШІ.

Наприклад, для завантаження набору даних NSL-KDD у фрейм для аналізу даних і машинного навчання за допомогою програмної бібліотеки pandas, використовується наступний код:

```
import pandas as pd
df = pd.read_csv('NSL-KDD/KDDTrain+.txt')
```

Впровадження методів ШІ та МН може значно підвищити продуктивність систем виявлення загроз. Наприклад, системи виявлення вторгнень можуть ідентифікувати різноманітні кіберзагрози та атаки, навіть невідомі атаки нульового дня, і реагувати в режимі реального часу на основі вимог користувачів.

Деякі додаткові бібліотеки AI, які можна використовувати для виявлення загроз:

– Keras: високорівневий API для нейронних мереж, написаний на Python і здатний працювати поверх TensorFlow, CNTK або Theano.

– Pandas: програмна бібліотека, яка пропонує структури даних і операції для роботи з числовими таблицями та часовими рядами, написана на мові програмування Python для обробки та аналізу даних.

– Numpy: бібліотека для мови програмування Python, що додає підтримку великих багатовимірних масивів і матриць разом із великою колекцією математичних функцій високого рівня для роботи з цими масивами.

Нижче наведено приклад програми реалізації бібліотеки для реалізації простої нейронної мережі та виявлення загроз:

```
import pandas as pd
import numpy as np
from keras.models import Sequential
from keras.layers import Dense
data = pd.read_csv('NSL-KDD/KDDTrain+.txt')
X = data.drop('label', axis=1)
Y = data['label']
model = Sequential()
model.add(Dense(12, input_dim=8, activation = 'relu'))
model.add(Dense(8, activation = 'relu'))
model.add(Dense(1, activation = 'sigmoid'))
model.compile(loss='binary_crossentropy', optimizer='adam', metrics=[accuracy])
model.fit(X, Y, epochs=150, batch_size=10)
```

У представленій частині коду на першому етапі завантажується та попередньо оброблюється набір даних. На наступному етапі визначається проста нейронна мережа з одним вхідним шаром, одним прихованим шаром і одним вихідним шаром. Відбувається компіляція моделі за допомогою двійкової функції перехресних ентропійних втрат і оптимізатора 'Adam', а потім адаптація моделі до даних. Вихідні дані моделі визначаються, як передбачення того, чи є вхідні дані загрозою чи ні. В даному випадку наведено лише простий приклад фактичної реалізації, в залежності від конкретних вимог і контексту програма може бути більш комплексною і складною.

Автоматизоване реагування на інциденти (API) передбачає використання автоматизованих систем для виявлення інцидентів безпеки та реагування на них. Штучний інтелект може покращити API, забезпечивши виявлення загроз у реальному часі, автоматичне їх блокування і постійне навчання на основі минулих інцидентів. Нижче приведено приклад використання ШІ для вдосконалення API за допомогою Python і бібліотеки Scikit-learn для машинного навчання:

```
from sklearn.ensemble import RandomForestClassifier
from sklearn.model_selection import train_test_split
import pandas as pd
data = pd.read_csv('security_data.csv')
X = data.drop('threat_detected', axis=1)
Y = data['threat_detected']
X_train, X_test, Y_train, Y_test = train_test_split(X, Y, test_size=0.2, random_state=42)
clf = RandomForestClassifier(n_estimators=100)
clf.fit(X_train, Y_train)
y_pred = clf.predict(X_test)
for i in range(len(Y_pred)):
    if Y_pred[i] == 1:
        print('Threat detected in data point [X_test.iloc[i]]. Initiating automated response.')
```

Коли система ШІ виявляє загрозу, відбувається запуск повідомлення про те, що загроза була визначена у відповідному пакеті даних і відбувається автоматична реакція на неї.

Також ШІ може покращити виявлення фішингу, аналізуючи електронні листи або веб-сайти та визначаючи характеристики, які можуть вказувати на спробу фішингу. Нижче наведено приклад використання ШІ для виявлення фішингу за допомогою Python і Natural Language Toolkit (NLTK) для аналізу тексту:

```
import nltk
from sklearn.feature_extraction.text import CountVectorizer
from sklearn.naive_bayes import MultinomialNB
from sklearn.model_selection import train_test_split
import pandas as pd
data = pd.read_csv('phishing_data.csv')
X = data['email_text']
Y = data['is_phishing']
X_train, X_test, Y_train, Y_test = train_test_split(X, Y, test_size=0.2, random_state=42)
vectorizer = CountVectorizer()
X_train_counts = vectorizer.fit_transform(X_train)
clf = MultinomialNB()
clf.fit(X_train_counts, Y_train)
X_test_counts = vectorizer.transform(X_test)
Y_pred = clf.predict(X_test_counts)
for i in range(len(Y_pred)):
    if Y_pred[i] == 1:
        print(f'Phishing attempt detected in email: {X_test.iloc[i]}')
```

Система ШІ виявляє спробу фішингу на основі текстового вмісту електронних листів. Коли виявляється спроба фішингу, система запускає сповіщення про те, в якому листі знаходиться шкідливе повідомлення.

Шкідливе програмне забезпечення включає віруси, хробаки, трояни, програми-вимагачі та інші шкідливі програми. Штучний інтелект може покращити виявлення шкідливого програмного забезпечення, аналізуючи характеристики програмного забезпечення та ідентифікуючи функції, які можуть вказувати на його присутність. Нижче наведено приклад використання ШІ для покращення виявлення шкідливого програмного забезпечення за допомогою Python і бібліотеки TensorFlow для глибокого навчання:

```
import tensorflow as tf
from sklearn.model_selection import train_test_split
import pandas as pd
data = pd.read_csv('malware_data.csv')
X = data.drop('is_malware', axis=1)
Y = data['is_malware']
X_train, X_test, Y_train, Y_test = train_test_split(X, Y, test_size=0.2, random_state=42)
model = tf.keras.models.Sequential([
    tf.keras.layers.Dense(128, activation='relu'),
    tf.keras.layers.Dense(64, activation='relu'),
    tf.keras.layers.Dense(1, activation='sigmoid')
])
model.compile(optimizer='adam', loss='binary_crossentropy', metrics=['accuracy'])
model.fit(X_train, Y_train, epochs=5)
y_pred = model.predict(X_test)
for i in range(len(y_pred)):
    if y_pred[i] >= 0.5:
        print(f'Malware detected in software: {X_test.iloc[i]}')
```

Система ШІ виявляє шкідливі програми на основі характеристик програмного забезпечення і при виявленні загрози вона запускає автоматичне сповіщення.

Висновки. Представлена робота демонструє значний потенціал використання штучного інтелекту для посилення заходів в галузі кібербезпеки. Аналіз загроз на основі ШІ може покращити виявлення загроз і час реагування, забезпечуючи надійний захист від кібератак. Крім того, застосування штучного інтелекту в кібербезпеці не тільки призводить до збільшення випадків виявлення загроз, але й має позитивний вплив автоматизованого реагування на інциденти. Наведенні моделі можуть аналізувати загрози та реагувати на них у реальному часі, скорочуючи час, необхідний для зниження ефективності потенційних кібератак.

Визначено що ШІ також може покращити виявлення фішингу та шкідливих програм. Аналізуючи закономірності та аномалії в даних, моделі штучного інтелекту можуть виявити й позначити потенційне шкідливе програмне забезпечення, додаючи нові можливості для систем кібербезпеки.

Список літератури:

1. Jordan M. I., Mitchell T. M. Machine learning: Trends, perspectives, and prospects. *Science*, vol. 349, no. 6245, pp. 255-260, 2015.
2. LeCun Y., Bengio Y., Hinton G. Deep learning. *Nature*, vol. 521, no. 7553, pp. 436-444, 2015.
3. Mehedi Hasan M. A., Salah K., Jayaraman R., Iqbal Hossain M., Alhamad M., Guizani A. Cybersecurity data science: an overview and future direction. *Journal of Big Data*, vol. 7, no. 1, pp. 1-25, 2020. URL: <https://journalofbigdata.springeropen.com/counter/pdf/10.1186/s40537-020-00318-5.pdf>.
4. Sarker I. H. Machine Learning: Algorithms, Real-World Applications and Research Directions. *SN Computer Science*, vol. 2, no. 2, pp. 1-25, 2021. URL: <https://dx.doi.org/10.1007/s42979-021-00592-x>.
5. Torska N. 500+ Data Breach Statistics: Hystory, Cost & Preventing. *MarketSplash*. 2023. URL: <https://marketsplash.com/data-breach-statistics/>.
6. Cost of a Data Breach Report 2023. *IBM*. 2023. URL: <https://www.ibm.com/reports/data-breach>
7. Zeadally S., Adi E., Baig Z., Khan I. A. Harnessing Artificial Intelligence Capabilities to Improve Cybersecurity. *IEEE Access*, vol. 8, pp. 31830-31850, 2020. URL: <https://dx.doi.org/10.1109/ACCESS.2020.2968045>.
8. Sarker I. H., Furhad M. H., Nowrozy R. AI-Driven Cybersecurity: An Overview, Security Intelligence Modeling and Research Directions, *SN Computer Science*, vol. 2, no. 2, pp. 1-25, 2021. URL: <https://dx.doi.org/10.1007/s42979-021-00557-0>.

Statsenko D.V., Statsenko V.V., Zlotenko B.M., Demishonkova S.A. RESEARCH OF PROGRAMS BASED ON ARTIFICIAL INTELLIGENCE AS COMPUTER TOOLS FOR INFORMATION PROTECTION

The paper examines the use of artificial intelligence and machine learning to improve computer systems for analyzing and protecting against cyber threats. It has been noted that in recent years there has been improvement

and development of new types of malicious software, which is why continuing to use traditional protection systems today is ineffective. A literature review found that the global recovery cost of a typical data breach is over US \$4.45 million. This indicates the need for additional improvement of protection systems with the involvement of artificial intelligence technologies, with the aim of reducing additional consumption of time and resources.

The article proposes the use of programs based on artificial intelligence to identify and detect threats using machine learning to adapt and predict the appearance of new or modification of existing malicious software.

It is noted that the use of machine learning increases the possibilities of automation of cyber security systems and the accuracy of threat detection. Artificial intelligence can increase the number of opportunities to identify threats and alert security professionals to detect and block potential malware.

As a result of the research, it is presented that the identification of threats based on artificial intelligence increases the efficiency and quality of programs of computer protection systems. Artificial intelligence usage patterns are presented, indicating that phishing and malware detection technologies are improving. It has been demonstrated that machine learning algorithms can lead to an increase in the effectiveness of identifying patterns and other anomalies that indicate potential cyber threats. By analyzing patterns and anomalies in data, AI models can detect and flag potential malware, adding new capabilities to cybersecurity systems.

Key words: *artificial intelligence, machine learning, cyber security, information protection, malicious software.*

UDC 004.052

DOI <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2023.5/39>

Fomin O.O.

Odessa Polytechnic National University

Krykun V.A.

Odessa Polytechnic National University

Orlov A.A.

Odessa Polytechnic National University

Tataryn O.V.

Odessa Polytechnic National University

Litynskyi V.V.

Odessa Polytechnic National University

MATHEMATICAL MODELS OF SOFTWARE QUALITY ASSURANCE FOR INTERPRETATION OF DYNAMIC NEURAL NETWORKS

The article considers mathematical methods of software engineering in the problems of software quality assurance of intelligent systems. The indicators of functional suitability and freedom from risk in accordance with the international standard ISO/IEC 25010 are used as evaluation characteristics of software quality. The aim of the work is to improve the quality of dynamic neural network interpretation software using more adequate and accurate surrogate models in the form of functional series based on multidimensional weight functions. To achieve this goal, the following tasks were solved: the structures of neural networks for modeling nonlinear dynamic objects were investigated; analytical dependencies between the parameters of neural networks and multidimensional weight functions of the object were established; the method of constructing nonlinear dynamic models of time delay neural network interpretation in the form of functional series was further developed. The scientific novelty of the work lies in determining the information connection between time delay neural networks and functional series based on multidimensional weight functions. To reduce the computational volume of neural network training process, a linear rectification function is used as an activation function. To simplify the mathematical calculations, the linear rectification function is approximated by a polynomial in a certain interval. The practical utility of the work is to develop an algorithm for constructing surrogate models of nonlinear dynamic objects in the form of the functional series based on multidimensional weight functions by the results of training a time delay neural network. The practical significance of the obtained results is to improve the accuracy of neural network interpretation models used in intelligent systems software. The study of the proposed nonlinear surrogate model is carried out on the example of a test nonlinear dynamic object. The experiment demonstrates the advantages in accuracy of the surrogate models in the form of a functional series over the linear surrogate model.

Key words: time-delay neural networks, surrogate models, nonlinear dynamic objects, software quality.

Introduction. Computer system software has become extremely widespread in the modern world. Almost all branches of the national economy use computers with specialized software to solve a variety of tasks from office activities to applied tasks of control, management, diagnostics and prediction of the behavior of objects and processes of any nature. As the scope of specialized software use grows, so do the requirements for its quality. In these conditions, insufficient quality of software becomes not only a weakness but also a danger in critical areas of activity: production processes, transportation, medicine, etc.

Therefore, ensuring the quality of software used in these areas is an important issue.

One of the areas of software engineering that has been developing rapidly in recent years is intelligent systems and machine learning. This area, of course, belongs to the critical areas of activity, so the issue of ensuring the quality of software for intelligent data processing is an urgent and, in general, unsolved problem.

The evaluation characteristics of software quality are regulated by the international standard ISO/IEC 25010. According to the standard, the set

of characteristics and attributes of the quality model that reflect the requirements for the functioning of a software product is defined, among other things:

– Functional suitability: the ability of the software to solve the tasks required by users in certain conditions,

– Freedom from risk: the ability of the software to mitigate the negative effects of economic, health and safety risks.

Both characteristics depend on the adequacy and accuracy of the mathematical models used in machine learning.

The task of improving the quality of software for intelligent systems is complicated by the fact that the vast majority of modern control objects have nonlinear and dynamic properties, due to which they can function in more complex modes that cannot be realized using linear characteristics. In view of this, a significant improvement of these characteristics of the quality of software of intelligent systems can be achieved not so much with the help of technological and organizational means as through the development of mathematical and algorithmic methods of software engineering. This paper is devoted to the improvement of mathematical models of machine learning as an effective method of software quality assurance.

Statement of the problem. An analysis of recent research and publications has revealed a lack of mathematical methods for improving the quality of software of intelligent systems, including methods based on the construction of nonlinear surrogate models that interpret the work of neural network (NN) [9–11]. Therefore, the task of ensuring the quality of intelligent systems software by building interpretation models in the form of functional series based on multidimensional weight functions [4, 12] instead of linear surrogate models that replace NN is relevant and promising.

This work is aimed at eliminating the existing gap and is focused on the study of mathematical methods for improving the quality of intelligent systems software in the tasks of modeling dynamic objects with nonlinear characteristics and identifying the scope of their effective application in solving applied identification problems in critical areas of activity. This determines the purpose and objectives of this study.

Analysis of recent research and publications. In modern modeling of complex objects, NN are widely used. The convenience of using NN is due to the possibility of their construction only on the basis of measured data at the input and output of the object without any assumptions about the structure of the object and the internal laws of its

functioning [1, 2]. Therefore, the use of NN to describe nonlinear dynamic objects, in particular, with continuous characteristics, is also becoming more widespread.

However, due to the high nonlinearity and complex interactions of a large number of parameters, NN do not explicitly reflect the structure and internal laws of the object's functioning [3]. As a result, NN do not provide transparency of the transformation of input data into output. Such structures are not convenient for studying the behavior of complex objects compared to analytical models, so finding ways to combine the advantages of NN and analytical models is a promising area of research to solve the problem of identifying complex objects [3, 4].

An effective way to improve the quality of software is to use more adequate and accurate mathematical models (surrogate models) that replace NN and, in some cases, interpret their behavior for humans.

Today, methods for building linear surrogate models are common [5, 6]. However, such models are of little use for identifying nonlinear objects. For a wide class of nonlinear dynamic objects, the relationship between the influence $x(t)$ and the response $y(t)$ can be explicitly represented by a functional (integral-step) series based on multidimensional weight functions [7, 8]. Due to the simultaneous consideration of nonlinear and inertial properties of the object, these models provide high adequacy of the control object and solution accuracy.

The aim of the article is to improve the quality of software for the interpretation of dynamic NN by using more adequate and accurate surrogate models in the form of functional series based on multidimensional weight functions.

To achieve this goal, the following tasks were set.

1. Selecting and studying the structure of NN for modeling nonlinear dynamic objects.
2. Establishing analytical dependencies between the parameters of the NN and the multidimensional weighting functions of the object.
3. Development of an algorithm for constructing a surrogate model in the form of a functional series based on multidimensional weight functions based on the results of NN training.

Dynamic models based on neural networks. Several methods are known for modeling nonlinear dynamic objects using NN [13]: dynamic neuro-spatial mapping (Dynamic Neuro-SM) [13–16], dynamic Wiener-type DNN [13, 17–19], and time-delayed NNs (TDNN) [12, 20, 21]. Among these model variants, TDNN is the most general structure consisting of several layers with direct signal

propagation [4, 12, 21]. Such models are capable of learning from the input-output data of objects and have excellent convergence properties [4, 12, 21], which is an advantage over the aforementioned Dynamic Neuro-SM and Wiener-type DNN methods.

There are many TDNN structures: with multiple hidden layers, different activation functions, and topologies. In this paper, we consider a common TDNN structure consisting of three layers: input, hidden and output.

The TDNN input layer includes M neurons, where M is the memory size of the object model. The number of neurons M is chosen to best reflect the dynamic properties of the object [4, 12]. The layer receives input data $\mathbf{x}(t_n)=[x(t_n), x(t_{n-1}), \dots, x(t_{n-M+1})]$, $t_n=n\Delta t, n=1, 2, \dots$

The hidden layer includes K neurons with a nonlinear activation function. The number of neurons K is chosen to best reflect the nonlinear properties of the object.

The output layer includes 1 neuron with a linear activation function. The signal $y(t_n)$ at the output layer at time t_n depends both on the value of the input signal $x(t_n)$ at the current time t_n , and on the input data $x(t_{n-1}), \dots, x(t_{n-M+1})$ at times $t_{n-1}, \dots, t_{n-M+1}$. Thus, the output data $y(t_n)$ of the TDNN model is determined by the expression [12]:

$$y(t_n) = b_0 + S_0 \sum_{i=1}^K w_i S_i \left(b_i + \sum_{j=1}^M w_{i,j} x(t_{n-j}) \right) \quad (1)$$

where b_0, b_i are the biases of the output and hidden layer neurons, respectively; S_0, S_i are the activation functions of the output and input layer neurons, respectively; $w_p, w_{i,j}$ are the weighting coefficients of the output and hidden layer neurons, respectively.

The most commonly used neuronal activation function S_i in the literature is the sigmoid and its derivatives, such as the hyperbolic tangent. Other activation functions can also be used, such as polynomial, sinusoidal, Gaussian, etc., or their combinations, depending on the purpose of a particular application.

The use of these functions has several advantages: they are nonlinear functions that approximate other nonlinear functions well; they are not discrete (stepwise), which makes activation analogous; they have smooth continuous derivatives.

Functional series based on multidimensional weight functions. Nonlinear systems with dynamic characteristics can be conveniently described using functional series based on multidimensional weight functions [4, 8, 12]. In the discrete form, functional series are used to describe an object with one input and one output in the time domain in the form of:

$$y(t_n) = \sum_{p=0}^{\infty} \sum_{k=0}^n v_p(k, \dots, k) \prod_{i=1}^p x(t_n - k\Delta t) = \\ = w_0 + \sum_{k=0}^n v_1(k) x(t_n - k\Delta t) + \sum_{k_1=0}^n \sum_{k_2=0}^n v_2(k_1, k_2) x(t_n - k_1\Delta t) x(t_n - k_2\Delta t) + \\ + \sum_{k_1=0}^n \sum_{k_2=0}^n \sum_{k_3=0}^n v_3(k_1, k_2, k_3) x(t_n - k_1\Delta t) x(t_n - k_2\Delta t) x(t_n - k_3\Delta t) + \dots \quad (2)$$

where $v_n(k_1, \dots, k_n)$ is a multidimensional weighting function of the p^{th} order in discrete form ($p=1, 2, 3, \dots$), symmetric with respect to the real variables k_1, \dots, k_n ; n is the current count; $[0, n]$ is the summation interval, practically limited by the finite duration of the memory effect in the system.

The functional series based on multivariate weight functions (2) is a generalization of the power series to a functional space. The first term of the series is a well-known convolution integral, and the higher-order terms take into account higher-order dynamic nonlinearities. Thus, series (2) generalizes the convolution integral to the case of nonlinear objects.

The use of functional series makes it possible to take into account the nonlinear and inertial properties of an object more fully and accurately, makes the identification procedure more universal, and increases the accuracy of identification. These properties of models of nonlinear dynamic systems based on functional series have led to their widespread use in solving problems of modeling, identification, and synthesis of nonlinear systems.

Information connection of TDNN models and functional series. To date, there is no universal mathematical apparatus for converting NN into functional series. For the NN with the above-mentioned common activation functions (sigmoid, hyperbolic tangent, etc.), there have been attempts in the literature to build surrogate models in the form of functional series [12, 22].

But these functions have significant drawbacks. First, when moving away from the point $x=0$, the values of $S_i(x)$ of the sigmoidal function tend to react weakly to changes in the variable x . Consequently, the derivative in such regions takes small values, which leads to problems with the calculation of the gradient in the computer implementation of the learning algorithm: the gradient does not change due to extremely small values of the derivative. This leads to the fact that the NN refuses to learn further or does so extremely slowly [23, 24].

In order to reduce the computational burden and, therefore, speed up the training of NN, the linear rectification function (ReLU) is used as an activation function in practice:

$$S_i = \max(0, x) \quad (3)$$

The ReLU function retains all the advantages of using a sigmoidal function: it is a nonlinear function that approximates other nonlinear functions well; it is not discrete (stepwise), which makes activation analog;

it has smooth continuous derivatives. In addition, this function is able to "dilute" neuronal activation. For example, for an NN with a large number of neurons, using a sigmoidal function as an activation function will cause all neurons to be activated to describe the network output. This is computationally expensive. If some neurons with negligible values of the activation function are excluded from the computational process – dilute the activation – the computational load will be significantly reduced, and the calculations will become more efficient. This is exactly what the activation function of ReLU can do, returning 0 for negative values of x [23, 24].

The disadvantage of a ReLU activation function NN is the difficulty in training. Most algorithms for training and optimizing NN parameters, including those based on the principle of backward error propagation, require a smooth activation function.

A well-known practice for solving this problem is to use a polynomial function that is as close as possible to the activation function in a certain interval $[-q, q]$:

$$S_i = \sum_{p=0}^H a_p x^p \quad (4)$$

where p is the order of the polynomial, $p=0,1,2,\dots$

If we approximate function (3) with a polynomial (4) on a certain interval $[-q, q]$ and the function $S_0 = x$ to simplify mathematical calculations, the expression for the network model (1) can be written as follows:

$$y(n) = b_0 + \sum_{i=0}^K w_i \sum_{p=0}^H a_p \left(b_i + \sum_{j=0}^M w_{i,j} x(n-j) \right)^p \quad (5)$$

Analyzing expressions (2) and (5), we can conclude that they are isomorphic with respect to each other. Therefore, to build a surrogate model for TDNN, it is necessary to establish an information link between the functional series (2) and the TDNN models (5).

Thus, by setting the degree of the approximating polynomial H , it is possible to obtain the information connection of models in the form of TDNN and functional series in an analytical form.

$p=0$:

$$y(n) = b_0 + a_0 \sum_{i=0}^K w_i \quad (6)$$

$$v_0 = b_0 + a_0 \sum_{i=0}^K w_i \quad (7)$$

$p=1$:

$$y(n) = b_0 + \sum_{i=0}^K w_i (a_0 + a_1 b_i) + a_1 \sum_{i=0}^K w_i \sum_{j=0}^M w_{i,j} x(n-j) \quad (8)$$

$$v_0 = b_0 + \sum_{i=0}^K w_i (a_0 + a_1 b_i); \quad v_1 = a_1 \sum_{i=0}^K w_i \sum_{j=0}^M w_{i,j} \quad (9)$$

$p=2$:

$$y(n) = b_0 + \sum_{i=0}^K w_i (a_0 + a_1 b_i + a_2 b_i^2) + \sum_{i=0}^K w_i (a_1 + 2a_2 b_i) \sum_{j=0}^M w_{i,j} x(n-j) + a_2 \sum_{i=0}^K w_i \sum_{j=0}^M w_{i,j}^2 x^2(n-j) \quad (10)$$

$$v_0 = b_0 + \sum_{i=0}^K w_i (a_0 + a_1 b_i + a_2 b_i^2); \quad v_1 = \sum_{i=0}^K w_i (a_1 + 2a_2 b_i) \sum_{j=0}^M w_{i,j}; \quad (11)$$

$$v_2 = a_2 \sum_{i=0}^K w_i \sum_{j=0}^M w_{i,j}^2$$

$p=3$:

$$y(n) = b_0 + \sum_{i=0}^K w_i (a_0 + a_1 b_i + a_2 b_i^2 + a_3 b_i^3) + \sum_{i=0}^K w_i (a_1 + 2a_2 b_i + 3a_3 b_i^2) \sum_{j=0}^M w_{i,j} x(n-j) + \sum_{i=0}^K w_i (1 + 3a_3 b_i) \sum_{j=0}^M w_{i,j}^2 x^2(n-j) + a_3 \sum_{i=0}^K w_i \sum_{j=0}^M w_{i,j}^3 x^3(n-j) \quad (12)$$

$$v_0 = b_0 + \sum_{i=0}^K w_i (a_0 + a_1 b_i + a_2 b_i^2 + a_3 b_i^3); \quad v_1 = \sum_{i=0}^K w_i (a_1 + 2a_2 b_i + 3a_3 b_i^2) \sum_{j=0}^M w_{i,j}; \quad (13)$$

$$v_2 = \sum_{i=0}^K w_i (1 + 3a_3 b_i) \sum_{j=0}^M w_{i,j}^2; \quad v_3 = a_3 \sum_{i=0}^K w_i \sum_{j=0}^M w_{i,j}^3$$

Expressions (7), (9), (11), (13) are estimates of multivariate weight functions of orders $p=0, 1, 2, 3$, respectively, obtained using TDNN. Similarly, expressions for estimates of multivariate weight functions of higher orders can be obtained, but in practice, models in the form of functional series of higher orders are rarely used.

Thus, the estimates of multidimensional weight functions can be expressed in terms of the neuronal bias values b_{0p} , b_j and weight coefficients w_p , $w_{i,j}$ ($i=1,\dots,K, j=1,\dots,M$) of the output and hidden layers of the NN, respectively, and the coefficients a_p of the polynomial approximating the activation function in the hidden layer.

The accuracy of the approximation of the polynomial function (4) is closely related to the quality of the NN. Therefore, to calculate the polynomial approximation of function (3) on the set $\{x_i, \max(0, x_i)\}$ (where x_i are random values on the interval $[-q, q]$ with a normal distribution), a least-squares regression method is used [25].

To calculate the polynomial approximation of the ReLU on the standard normal distribution, we use the polynomial function *Polynomial.fit* from the Python numpy package. Using this function for the input data $\{x_i, \max(0, x_i)\}$ and different orders p of the approximation function gives sets of coefficients $a_i, i=1,\dots,p$. The results of approximating the ReLU function using polynomials of different orders with a standard normal distribution of 99.73% on the interval $[-3, 3]$ are shown in Table 1.

A method for constructing a nonlinear dynamic surrogate model. The significant practical value of the constructed connection of TDNN-based models and functional series based on multidimensional weight functions lies in the further development of the method for estimating multidimensional weight functions directly from the parameters of the NN [4, 12, 22]. This method is useful in the tasks of ensuring the quality of intelligent systems software by using more adequate and accurate surrogate models in the form of functional series based on multidimensional weight functions.

The algorithm of the method of constructing surrogate models in the form of functional series based

Approximation of the linear rectification function using polynomials of different orders

The degree of a polynomial	Polynomial S_i	Accuracy approximations
1	$0.85714286 + 1.5 x$	1.857
2	$0.1992 + 0.5002 x + 0.1997 x^2$	0,279
3	$0.1995 + 0.5002 x + 0.1994 x^2 - 0.0164 x^3$	0,161
4	$0.1298 + 1.500-x + 2.5909-x^2 - 0.0001 x^3 - 1.2272-x^4$	0.038

on the results of training TDNN with the activation function ReLU takes the following sequence of steps:

Step 1. Determine the model memory size M , the number of neurons in the hidden layer K , and the modeling accuracy e .

Step 2. Set the set $\mathbf{D}(t)=\{\mathbf{x}(t_n), y(t_n)\}$ – training set, $n=1, \dots, N$, where N is the number of measurements in the input-output experiment; define the operation of preliminary data normalization by the expression:

$$\mathbf{D}'(t)=[(\mathbf{D}(t)-\text{mean}(\mathbf{D}(t)))/(\text{max}(\mathbf{D}(t))-\text{min}(\mathbf{D}(t)))] \quad (14)$$

Step 3. Take the number of training iteration $s=1$, initialize the shift vectors $\mathbf{B}=[b_o, b_j]$ and the weighting coefficients $\mathbf{W}=[w_p, w_{ij}]$ ($i=1, \dots, K, j=1, \dots, M$) using a random value on the interval $(0,1)$.

Step 4. Determine, based on one of the back propagation algorithms, the bias errors b_o, b_j and the weighting factors w_p, w_{ij} of the NN.

Step 5. Check the conditions for completing the training. If $e_s(t) \leq e$ go to *Step 6*, otherwise $s=s+1$ and go to *Step 4*.

Step 6. Determine the multidimensional weighting functions using expressions (6)-(13).

The above algorithm can be compactly written using pseudocode:

Algorithm: *surrogate_nn_model*

Input: $M, K, \varepsilon, E, N, \mathbf{D}$

Output: \mathbf{V}_n

normalize $\leftarrow \mathbf{D}$

$\mathbf{D}_{\text{train}}, \mathbf{D}_{\text{test}} \leftarrow \mathbf{D}$

random $\leftarrow \mathbf{B}[K], \mathbf{W}[M, K]$

epoch $\leftarrow 0$

while *epoch* $< E$ or $e_s(t) > e$ **do**

epoch $\leftarrow \text{epoch} + 1$

for $i = 1, \dots, N$ **do**

evaluations $\leftarrow \text{training procedure}(\mathbf{B}, \mathbf{W}, \mathbf{D}_{\text{train}}, e)$

end for

loss $\leftarrow \text{mse}(\mathbf{B}, \mathbf{W}, \mathbf{D})_{\text{test}}$

end while

$\mathbf{V} \leftarrow \text{bwf}(\mathbf{B}, \mathbf{W})$

Investigation of the accuracy of a nonlinear surrogate model in the form of a functional series.

The study of the proposed nonlinear surrogate model is carried out on the example of a test nonlinear dynamic object. The simulation model of the test object with a first-order dynamic block and a nonlinear feedback block [4] is shown in Fig. 1.

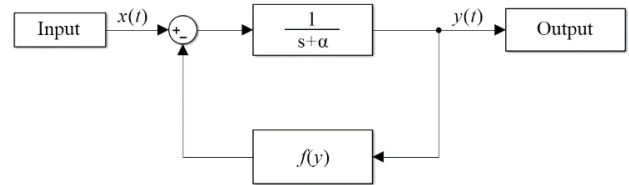


Fig. 1. Simulation model of the test nonlinear dynamic object

The feedback block uses a nonlinear function with saturation as $f(y)$:

$$f_2(y) = \begin{cases} s, & y > p \\ k \cdot y, & |y| \leq p \\ -s, & y < -p \end{cases} \quad (15)$$

where s is the saturation level, p is the saturation start point, and $k=s/p$ is the gain. The following parameters of the simulation model were adopted: $\alpha=2.64; s=0.7, p=0.7, k=1$.

To determine the accuracy of the proposed surrogate model in the form of a functional series based on multidimensional weight functions $y_v(t)$, the test nonlinear dynamic object is identified based on the results of input/output experiments. The obtained results are compared with the simulation model $y(t)$, the neural network model $y_n(t)$, and the linear surrogate model $y_l(t)$, built on the same data (Fig. 2).

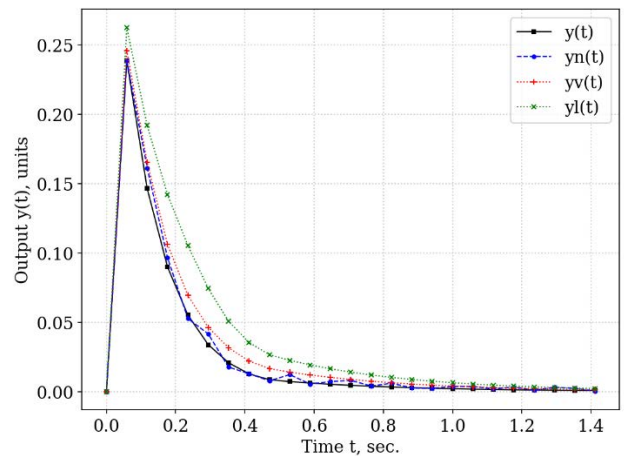


Fig. 2. Comparison of the surrogate model in the form of a functional series $y_v(t)$ with the simulation model $y(t)$, the neural network model $y_n(t)$, and the linear surrogate model $y_l(t)$

The experiment demonstrates the advantages in accuracy of the surrogate model in the form of a functional series $y_s(t)$ over the linear surrogate model $y_l(t)$.

Conclusions. The work is devoted to the study of mathematical methods for improving the quality of intelligent systems software in the tasks of modeling dynamic objects with nonlinear characteristics and identifying the scope of their effective application in solving applied identification problems in critical areas of activity.

To model a dynamic object with nonlinear characteristics, the structure of an artificial neural network with time delays is substantiated. The analytical dependence between the weight coefficients of the neural network with time delays and the multidimensional weight functions of a nonlinear object is established.

The method of constructing nonlinear dynamic models for the interpretation of neural networks with time delays in the form of a functional series has been further developed. The advantage of the developed method in comparison with the existing ones is the increase in the training speed of a neural network with time delays by using the activation function of linear rectification.

The algorithm of the method of constructing a surrogate model in the form of a functional series based on multidimensional weight functions in the form of pseudo-code of the software of an intellectual system is created.

The created algorithm makes it possible to build nonlinear surrogate models that have advantages in accuracy over linear surrogate models.

Bibliography:

1. N. Todorovic and P. Klan, "State of the Art in Nonlinear Dynamical System Identification using Artificial Neural Networks," 2006 8th Seminar on Neural Network Applications in Electrical Engineering, Belgrade, Serbia, 2006, pp. 103-108.
2. C. Rudin and J. Radin, "Why are we using black box models in AI when we don't need to? A lesson from an explainable AI competition", Harvard Data Science Review, vol. 2, no. 1, 2019.
3. A. R. Rao and M. Reimherr, "Non-linear functional modelling using neural networks", 2021. (<https://arxiv.org/abs/2104.09371>)
4. Fomin, O., Polozhaenko, S., Krykun, V., Orlov, A., Lys, D. (2023). Interpretation of Dynamic Models Based on Neural Networks in the Form of Integral-Power Series. In: Arsenyeva, O., Romanova, T., Sukhonos, M., Tsegelnyk, Y. (eds) Smart Technologies in Urban Engineering. STUE 2022. Lecture Notes in Networks and Systems, vol 536. Springer, Cham, pp. 258-265.
5. Md. Rezaul Karim, Md. Shajalal, A. Graß, T. Döhmen, S.A. Chala, Ch. Beecks, S. Decker. Interpreting Black-box Machine Learning Models for High Dimensional Datasets. 2022. (<https://arxiv.org/abs/2208.13405>)
6. A. Agresti, "Foundations of linear and generalized linear models", Wiley series in probability and statistics, 2017.
7. J. Schoukens and L. Ljung, "Nonlinear System Identification: A User-Oriented Road Map", IEEE Control Systems Magazine, vol. 39, no. 6, 2019, pp. 28-99.
8. Pavlenko, V.D. and Pavlenko, S.V. 2023. Deterministic identification methods for nonlinear dynamical systems based on the Volterra Model. Applied Aspects of Information Technology. 1, 1 (Jun. 2023), pp. 11-32.
9. Murdoch, W. J., Singh, C., Kumbier, K., et al. (2019). Definitions, methods, and applications in interpretable machine learning. Proceedings of the National Academy of Sciences, 116(44), 22071– 22080. <https://doi.org/10.1073/pnas.1900654116>.
10. R. Guidotti, A. Monreale, S. Ruggieri, F. Turini, F. Giannotti, D. Pedreschi, A survey of methods for explaining black box models, in: ACM Computer Surveys, volume 51, no. 5, 2018, pp. 1–42. doi: 10.1145/3236009.
11. C. A. Mitrea, C. K. M. Lee, Z. Wu, A comparison between neural networks and traditional forecasting methods: case study, in: International journal of engineering business management, volume 1, no. 2, 2009, pp. 19–24. doi: 10.5772/6777.
12. G. Stegmayer, M. Pirola, G. Orenco, O. Chiotti, Towards a Volterra series representation from a neural network model, in: WSEAS Transactions on Circuits and Systems, archive 1, 2004, pp. 55–61.
13. W. Liu, W. Na, L. Zhu and Q. -J. Zhang, "A review of neural network based techniques for nonlinear microwave device modeling," 2016 IEEE MTT-S International Conference on Numerical Electromagnetic and Multiphysics Modeling and Optimization (NEMO), Beijing, China, 2016, pp. 1-2.
14. Wenyan Liu, L. Zhu, Weicong Na and Q. -J. Zhang, "An overview of Neuro-space mapping techniques for microwave device modeling," 2016 IEEE MTT-S Latin America Microwave Conference (LAMC), Puerto Vallarta, Mexico, 2016, pp. 1-3.
15. L. Zhu, Q. Zhang, K. Liu, Y. Ma, B. Peng and S. Yan, "A Novel Dynamic Neuro-Space Mapping Approach for Nonlinear Microwave Device Modeling," in IEEE Microwave and Wireless Components Letters, vol. 26, no. 2, 2016, pp. 131-133.

16. W. Liu, Y. Su and L. Zhu, "Nonlinear Device Modeling Based on Dynamic Neural Networks: A Review of Methods," 2021 IEEE 4th International Conference on Electronic Information and Communication Technology (ICEICT), Xi'an, China, 2021, pp. 662-665.
17. W. Liu, Y. Su, H. Tan, F. Feng and B. Zhang, "A Review of Wiener-Type Dynamic Neural Network for Nonlinear Device Modeling" 2022 IEEE MTT-S International Microwave Workshop Series on Advanced Materials and Processes for RF and THz Applications (IMWS-AMP), Guangzhou, China, 2022, pp. 1-3.
18. W. Liu, W. Na, L. Zhu, J. Ma and Q.-J. Zhang, "A Wiener-Type Dynamic Neural Network Approach to the Modeling of Nonlinear Microwave Devices," in IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, vol. 65, no. 6, 2017, pp. 2043-2062.
19. W. Liu, W. Na, F. Feng, L. Zhu and Q. Lin, "A Wiener-Type Dynamic Neural Network Approach to the Modeling of Nonlinear Microwave Devices and Its Applications," 2020 IEEE MTT-S International Conference on Numerical Electromagnetic and Multiphysics Modeling and Optimization (NEMO), Hangzhou, China, 2020, pp. 1-3.
20. M. Sugiyama, H. Sawai and A. H. Waibel, "Review of TDNN (time delay neural network) architectures for speech recognition", IEEE International Symposium on Circuits and Systems, vol. 1, 1991, pp. 582-585.
21. L. Wenyuan, L. Zhu, F. Feng, W. Zhang, Q.-J. Zhang, L. Qian and G. Liu, "A time delay neural network based technique for nonlinear microwave device modelling, in: Micromachines", Basel, vol. 11, no. 9, 2020, p. 831.
22. Ruban, O. Volterra neural network construction in the nonlinear dynamic systems modeling problem / O. Ruban // Herald of Advanced Information Technology. – Odesa, 2019. – Vol. 2, N 1. – P. 24-28.
23. J. Pomerat, A. Segev and R. Datta, "On Neural Network Activation Functions and Optimizers in Relation to Polynomial Regression," 2019 IEEE International Conference on Big Data (Big Data), Los Angeles, CA, USA, 2019, pp. 6183-6185, doi: 10.1109/BigData47090.2019.9005674.
24. Ramy E. Ali, Jinyun So and A. Salman Avestimehr. On Polynomial Approximations for Privacy-Preserving and Verifiable ReLU Networks. 2021. (<https://arxiv.org/abs/2011.05530>)
25. Chabanne, H., Wargny, A.D., Milgram, J., Morel, C., & Prouff, E. Privacy-Preserving Classification on Deep Neural Network.

Фомін О.О., Крикун В.А., Орлов А.А., Татарин О.В., Літинський В.В. МАТЕМАТИЧНІ МОДЕЛІ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ЯКОСТІ ПРОГРАМНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ІНТЕРПРЕТАЦІЇ ДИНАМІЧНИХ НЕЙРОННИХ МЕРЕЖ

Розглядаються математичні методи інженерії програмного забезпечення в задачах забезпечення якості програмного забезпечення інтелектуальних систем. В якості оціночних характеристик якості програмного забезпечення прийняті показники функціональної придатності та свободи від ризику згідно міжнародним стандартом ISO/IEC 25010. Метою роботи є підвищення якості програмного забезпечення інтерпретації динамічних нейронних мереж шляхом використання більш адекватних та точних сурогатних моделей у вигляді функціональних рядів на основі багатовимірних вагових функцій. Для досягнення поставленої мети вирішено наступні завдання: досліджено структури нейронних мереж для моделювання нелінійних динамічних об'єктів; встановлено аналітичні залежності між параметрами нейронними мережами та багатовимірними ваговими функціями об'єкту; набув подальшого розвитку метод побудови нелінійних динамічних моделей інтерпретації нейронних мереж з часовими затримками у вигляді функціональних рядів. Наукова новизна роботи полягає у визначенні інформаційного зв'язку між нейронними мережами з часовими затримками та функціональними рядами на основі багатовимірних вагових функцій. Для зниження обчислювального навантаження навчання нейронну мережу в якості активаційної функції використовується функція лінійної ректифікації. Для спрощення математичних викладок функцію лінійної ректифікації апроксимовано поліномом на певному інтервалі. Практична користь роботи полягає у розробці алгоритму методу побудови сурогатних моделей нелінійних динамічних об'єктів у вигляді функціонального ряду на основі багатовимірних вагових функцій за результатами навчання нейронної мережі з часовими затримками. Практичне значення одержаних результатів полягає у підвищенні точності моделей інтерпретації нейронних мереж, що використовуються в програмному забезпеченні інтелектуальних систем. Дослідження за-пропонованої нелінійної сурогатної моделі проведено на прикладі тестового нелінійного динамічного об'єкта. Експеримент демонструє переваги в точності сурогатної моделі у вигляді функціонального ряду над лінійною сурогатною моделлю.

Ключові слова: нейронні мережі з часовими затримками, сурогатні моделі, нелінійні динамічні об'єкти, якість програмного забезпечення.

Хазанович Ю.Ю.

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

Киричук Ю.В.

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

Черепанська І.Ю.

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

СУЧАСНИЙ СТАН ПРОБЛЕМИ СИНТЕЗУ КРОКУЮЧИХ МОБІЛЬНИХ РОБОТІВ

Синтез мобільних роботів (МР) можна вважати актуальним напрямком розвитку сучасної робототехніки, їх характерною особливістю є здатність МР виконувати, як рухомі функції аналогічні функціям людини, так і реалізовувати планування рухів та їх здійснення у тримірному нетермінованому просторі. Досягнення сучасності у галузі синтезу МР можна вважати вагомими, оскільки це підтверджується низкою наукових досліджень, як у вітчизняній, так і у світовій науці, що висвітлюють, як конструкцію, алгоритми роботи і керування, так і функціональне призначення та можливість МР. При цьому, не зважаючи на значні наукові та реальні практичні досягнення у цій галузі, можливо стверджувати, що важлива науково-технічна проблема побудови МР ще не вичерпана повністю.

Проаналізовані в даній роботі принципи синтезу МР, дозволяють стверджувати по відсутності загального методологічного підходу. Наслідком є різні погляди науковців та/або виробників щодо принципів, методів і технологій синтезу МР та застосування їх на власний розсуд для розв'язання конкретних задач. В той же час це є маркером, що сфера МР знаходиться у стадії стрімкого розвитку.

Також слід зазначити, що спостерігається певна позитивна тенденція яка проявляється у спробах сучасних науковців створити теоретичної основи для опису методики параметричного синтезу МР та використання ідентичних математичних апаратів для вирішення задачі кінематики та використанні рівнянь Лагранжа для опису динамічної моделі МР.

На основі аналізу останніх досліджень і публікацій здійсненого в даній роботі було зроблено висновки щодо сучасного стану проблеми синтезу МР. Також приводиться класифікація крокуючих МР за їх конструктивними особливостями, функціональним призначенням, математичними моделями динаміки та кінематики, алгоритмами керування та галузями застосування.

Ключові слова: крокуючий мобільний робот, крокуюча мобільна платформа, крокуючі механізми, квадропод, гексапод, октопод, робопавук, павук робот, математична модель, робототехнічні системи, автоматизація.

Постановка проблеми. Синтез мобільних роботів (МР) є одним із новітніх та актуальних напрямків розвитку сучасної робототехніки, характерною особливістю яких є здатність не тільки до виконання рухомих функцій аналогічних функціям людини, але й здатність до планування рухів у тримірному недетермінованому просторі. Сучасні досягнення у галузі синтезу МР досить вагомі, про що свідчить значна низка наукових досліджень у цій галузі, а також досить різноманітний ринок МР. Аналізуючи принципи синтезу та роботи МР очевидно, що всі вони мають різні

принципи побудови та алгоритми роботи і керування, точність, швидкість, функціональне призначення і можливості.

При цьому, не зважаючи на значні наукові та реальні практичні досягнення у цій галузі, важлива науково-технічна проблема побудови МР ще не вичерпана повністю. Для розвитку МР, як явища системного методологічного підходу для керування їх синтезом, слід враховувати досвід вчених із вітчизняної та світової науки.

Мета статті – проаналізувати відомі праці, що присвячені проблематиці синтезу крокуючих

МР та виявити системність їх синтезу, з огляду на стрімкий розвиток, робототехніки, у тому числі крокуючих МР та автоматизації в цілому.

Аналіз останніх досліджень і публікацій вказує, що на сьогоднішній день існує множина різноманітних МР, що використовуються у різних галузях діяльності людини. При цьому необхідно відмітити, що у роботах вітчизняних [5–15] та світових науковців [16–25] відсутній системний методологічний підхід щодо синтезу МР [5].

Відсутність системного методологічного підходу можна інтерпретувати двояко, оскільки одночасно це є маркером, що сфера крокуючих МР знаходиться у стадії стрімкого розвитку. В той же час, даний факт вказує на відсутність загального методологічного підходу, що призводить до того, що кожен науковець та/або виробник по різному бачить принципи, методи і технології синтезу МР та застосовує їх на власний розсуд для розв'язання конкретних задач. Так у роботах [6–9] проведено аналіз сучасних конструкцій роботизованих пристроїв для обрізки дерев та наводиться опис конструкції МР довільної орієнтації на стовбурах дерев (рис. 1).

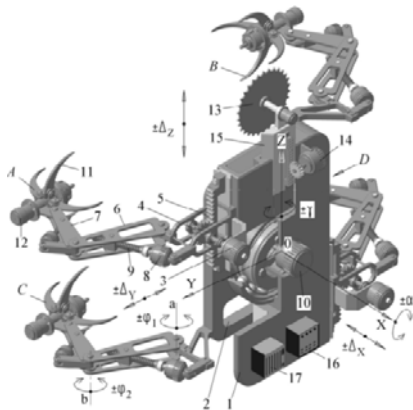


Рис. 1. МР для обрізки дерев, де 1 – верхня платформа, 2 – нижня платформа, 3 – двигун, 4 – шестірня, 5 – зубчаста рейка, 6 – стегно кінцівки МР, 7 – гомілки кінцівка МР, 8 – двигун керування кінцівкою МР, 9 – самогальмуючі гвинти, 10 – привід обертання, 11 – важелів-пазурі А, D і В, С, 12 – двигуни керування важелів-пазурів А, D і В, С, 13 – дискова пила, 14 – електромеханічний привід, 15 – каретка, 16 – бортовий комп'ютер, 17 – акумуляторна батарея [6]

Статті [6, 7] пропонують методику параметричного синтезу МР із рекомендаціями для синтезу крокуючих механізмів, що формує зв'язки між критеріями оптимізації та незалежними змінними всередині цільових функцій, а також зв'язок власне цільових функцій на різних рівнях МР. Серед особливостей та переваг методики параметричного

синтезу МР необхідно відмітити те, що вона є багатоетапною та містить чотири рівні, а її наявність як така значно спрощує впровадження МР у сфери обслуговування, як лісних та паркових деревних масивів, так і плодоовочевих господарств, а отже і автоматизацію процесу синтезу МР. Проте, представлена у статтях [6, 7] методика параметричного синтезу МР має низку недоліків, які полягають у тому, що вона має обмежене застосування і призначена для певних МР, а отже можна стверджувати про відсутність універсальності.

В роботах [10, 11] описана антропоморфна конструкція МР (рис. 2), що зменшує кількість приводів кінематичного ланцюга за рахунок уніфікації конструкції кінцівок, поєднання єдиного електродвигуна, герметичних камер кінцівки МР стегна і гомілки та кабельної передачі від зазначеного двигуна для згинання кінцівок МР. Стискання герметичних камер відбувається за рахунок власної ваги. В конструкції реалізована рекуперація енергії внаслідок стискання газу в газових камерах в процесі руху МР та гідравлічні амортизатори, що дозволяють компенсувати ударні навантаження викликані пересуванням МР. Використанні для опису динамічної моделі рівнянь Лагранжа в даній роботі можна розглядати, як тенденцією до синтезу МР.

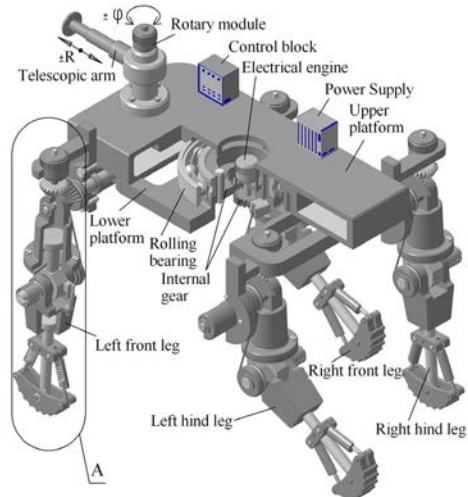


Рис. 2. Загальний вигляд антропоморфного крокуючого МР у чверті

Статті [12–15] пропонують використання крокуючого МР – гексаподу для контролю стану технічних сухих каналів, вентиляційних шахт та інших замкнутих просторів. Якщо в роботі [12] наводиться концепція крокуючого МР, то в роботі [13] запропоновано та розроблено схему системи живлення, яка поділяється на силову та вимірну частини електроніки МР.

У статтях [14, 15] наведено розроблений алгоритм обертання для двоногій та триногій ходи МР в обмеженому просторі. Алгоритм базується на Алгоритмі, який базується на основі матриць станів [14, 15] (рис. 3).

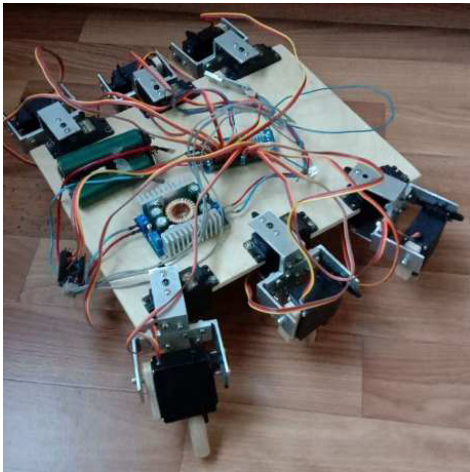


Рис. 3. Конструкція досліджуваного МР [15]

Автори статей [14, 15] стверджують про можливість використання алгоритму для різних за конструкцією МР (квадропод, гексапод, октопод). В процесі створення даного алгоритму вирішувались задачі статичної стійкості за рахунок модифікації матриці положення стану кінцівки. Також у літературі [14, 15] запропоновано ввести матрицю буферних станів кінцівок, для забезпечення запам'ятовування МР положення кінцівок у просторі у випадку відмови або не коректної роботи однієї чи декількох кінцівок. Матриця буферних станів дозволить продовжити рух МР або забезпечить його повернення у вихідну позицію для зміни маршруту пересування. Автори статей [14, 15] вказують на те, що виконані роботи в майбутньому можуть бути покладені в основу загальної методики параметричного синтезу, проте саму методику, як таку, не наводять, що в цілому вказує на обмеженість та декларативність наведеної інформації і унеможливорює її повноцінне використання іншими науковцями. Наведене вказує на очевидну відсутність системності щодо синтезу МР.

У статті [16] описані рівняння кінематики МР – гексапода, що представлені у матричній формі з використанням принципу обертання системи координат. Для опису динамічної моделі в даній роботі були використані рівняння Лагранжа, проте рух всього МР не розглядається. Отримано параметри оптимального руху на основі аналізу кінетичної енергії кінцівки МР (рис. 4).

Очевидно, що стійкою тенденцією у статті [10, 16] при синтезі МР є використання рівнянь Лагранжа для опису динаміки моделі.



Рис. 4. Загальний вигляд крокуючого МР-гексапода

Робота [17] описує математичну модель кінематики руху крокуючого павукopodobного МР за допомогою моделі Денавіта-Хартенберга, що дозволяє розв'язати пряму та обернену задачі кінематики крокуючого МР (рис. 5). Отримані результати надають можливість визначення положення механічної кінцівки у просторі за умови певних кутів повороту зчленувань кінцівки роботу, схематичне подання конструкції МР. Використання моделі Денавіта-Хартенберга у статті [17] дозволяє говорити про загальну тенденцію і деяку систематизацію підходу щодо синтезу МР.

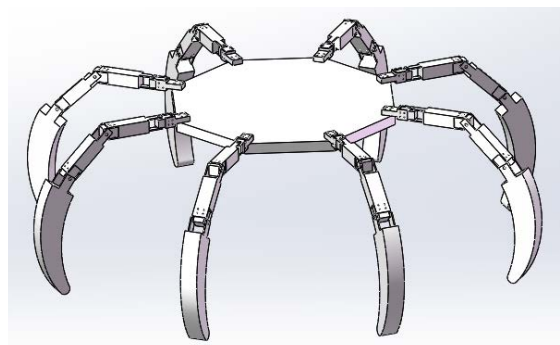


Рис. 5. Схематичне подання конструкції крокуючого МР

У статтях [18, 19] описуються процес пошуку загального підходу для розробки крокуючої системи-платформи, що здатна здійснювати багатоспрямовані стрибкові рухи. Так у статті [18] наводяться результати експериментів щодо визначення працездатності алгоритму керування МР (рис. 6) при реалізації багатоспрямованих стрибкових рухів для перевірки кінематики багатоспрямованого стрибкового руху, що дозволяє йому обминати перешкоди в процесі руху. Це забезпечує стабільність багатоспрямованих стрибкових рухів МР.

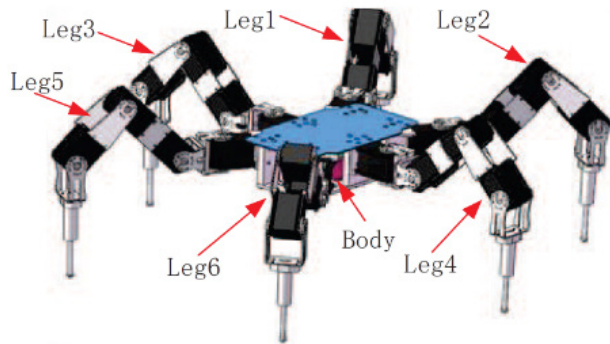


Рис. 6. Структурна модель стрибаючого МР [19]

Для розв'язання прямої та оберненої задачі кінематики у статтях [18, 19] використовується модель Денавіта-Хартенберга. Також наведена динамічна модель, яка побудована за допомогою рівнянь Лагранжа. Представлена система динамічного керування та наведено результати проведеного експериментального дослідження із застосуванням пакетів прикладних програм MATLAB і Adams для багатоспрямованого стрибкового руху. Наведене у роботах [18, 19] дозволяє частково забезпечити теоретичну основу подальших досліджень багатоспрямованих стрибкових рухів МР, оскільки для опису кінематики використовується традиційна модель Денавіта-Хартенберга, а для побудови динамічної моделі рівняння Лагранжа. Все це має ознаки часткової системності підходу щодо синтезу МР.

У роботі [20] була розроблена гексагональна конфігурація крокуючого МР – гексапода СНЗ-Р (рис. 7). Автори стверджують, що гексагональна конфігурація крокуючого МР, дозволяє досягти однакової швидкості пересування в напрямках. Для даної конфігурації МР у статті виконується його кінематичний аналіз у цілому, а також для кожної кінцівки окремо. Автори використовують для цього модель Денавіта-Хартенберга та програмне середовище MATLAB. Крім цього, у даній статті описана штучна нейронна мережа, що використовувалась для порівняння та прогнозування визначення кутів, часу навчання та загальної продуктивності крокуючого МР.

Слід зазначити, що використання моделі Денавіта-Хартенберга, дозволяє говорити про певну тенденцію до систематизації підходу щодо синтезу МР.

Робота [21] присвячена розв'язанню задачі спостереження за допомогою МР. Для її реалізації була розроблена електронна апаратна частина на основі мікроконтролера Atmega 128. В роботі за допомогою моделі Денавіта-Хартенберга вико-

нано аналіз кінематики та динаміки розробленого шестиногого крокуючого МР Snooper (рис. 8).

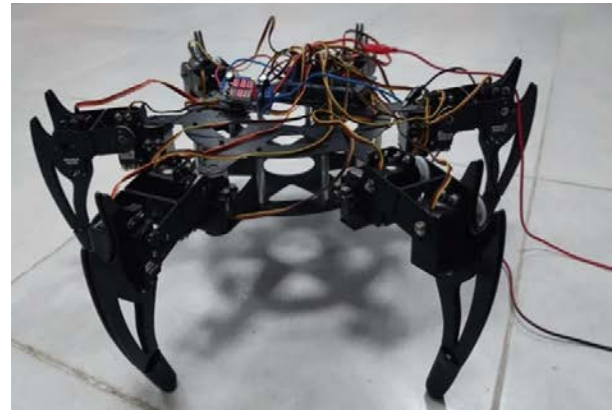


Рис. 7. Фото крокуючого МР СНЗ-Р

Також були проведені розрахунки динаміки із використанням програмного забезпечення MATLAB Simmechanics та проаналізовано алгоритм руху МР за різними методами ходьби. Використання моделі Денавіта-Хартенберга, дозволяє говорити про певну тенденцію до систематизації підходу щодо синтезу МР.

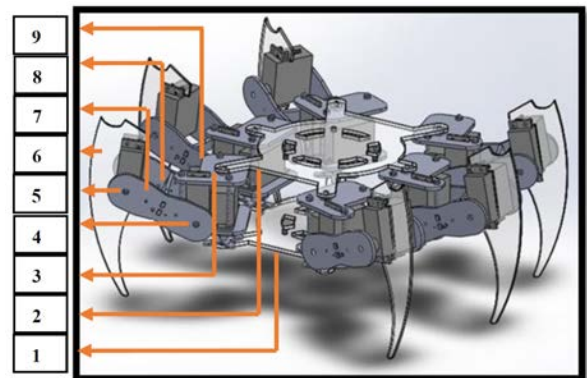


Рис. 8. Конструкція МР Snooper, де 1 – Нижня частина тіла; 2 – Верхня частина тіла; 3 – Коренний шарнір; 4 – Стегновий шарнір 2; 5 – Колінний шарнір; 6 – Гомілкорова кістка; 7 – Стегнова кістка; 8 – Зміцнювач стегна; 9 – Стегно

Робота [22] описує МР Little Crabster LCR200 (рис. 9), що є наземним випробувальним роботом, який було побудовано в рамках роботи над крокуючим МР Crabster для підводних досліджень. Задачами роботи є розробка алгоритму ходьби з високою стійкістю у складних умовах пересування, що досягається за рахунок використання сенсорів із зворотнім зв'язком для керування центром тяжіння (ЦТ).

В роботі описано алгоритм, що дозволяє перемикати контролери для балансування ЦТ в під час ходьби відповідно до зміни числа опорних кінцівок в момент руху МР.

Дана робота може стати основою в майбутньому для методики параметричного синтезу, оскільки в майбутньому планується використати даний алгоритм для МР Crabster, який передбачається для підводних досліджень, тобто можна стверджувати про тенденцію щодо синтезу МР.



Рис. 9. Шестиногий крокуючий МР Little Crabster, LCR200

Для опису кінематики чотириноного крокуючого МР (рис. 10) автори у роботах [23, 24] представляють його, як Платформу Стюарта [25] та описують динамічна модель МР. Серед недоліків, в контексті синтезу МР можна виділити, те що даний метод використовує складний математичний апарат, який потребує додаткової підготовки кваліфікованих кадрів.

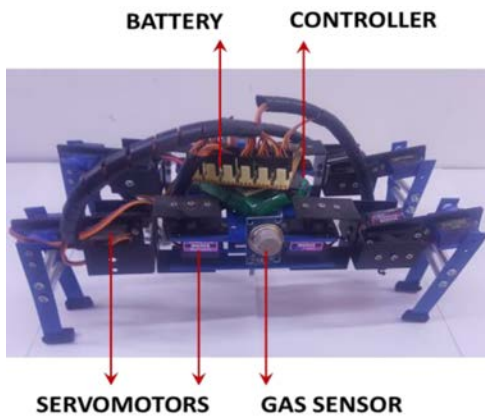


Рис. 10. Конструкція та прототип чотириноного МР

Метою роботи [23] є математичне відображення ходьби чотирилапих тварин та павуків, для цього було проаналізовано рух павука для створення власного крокуючого МР. У статті наведено результати симуляції руху МР у програмному забезпеченні MATLAB.

Стаття [24] є продовженням роботи [23] над крокуючим МР та поглиблює дослідження щодо розв'язання задачі вимірювання індексу вуглекислого газу, шляхом встановлення відповідних датчиків та сенсорів на МР. Оскільки в роботі для опису кінематики не використовувалась модель Денавіта-

Хартенберга, то слід можливо зробити висновок про відсутність тенденції щодо синтезу МР.

Виклад основного матеріалу. Виконаний вище аналіз останніх досліджень і публікацій дозволяє здійснити класифікацію крокуючих МР за їх конструктивними особливостями, функціональним призначенням, математичними моделями динаміки та кінематики, алгоритмами керування та галузями застосування (табл. 1).

Із табл. 1 видно, що на сьогодні при синтезі МР автори не дотримуються загальних підходів через відсутність системного методологічного підходу. При цьому можна говорити про наявність позитивної тенденції до систематизації методологічного підходу синтезу, що проявляється у:

- Спробах сучасних науковців створити теоретичної основи для опису методики параметричного синтезу МР;
- Використання єдиного математичного апарату для вирішення задачі кінематики МР, зокрема моделі Денавіта-Хартенберга;
- Використання єдиного математичного апарату для опису динамічної моделі крокуючих МР – використовуються рівняння Лагранжа.



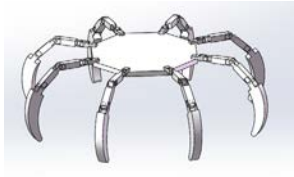
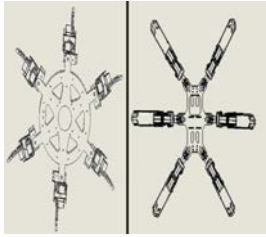
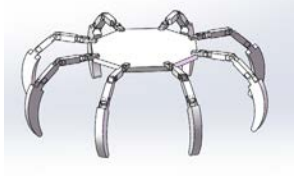
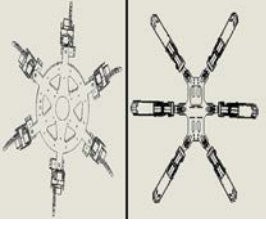
Відсутність системного підходу можна інтерпретувати двояко, оскільки даний факт вказує на відсутність загального методологічного підходу, що було підтверджено аналізом відомих наукових робіт. В той же час це є маркером, що сфера МР знаходиться у стадії стрімкого розвитку.

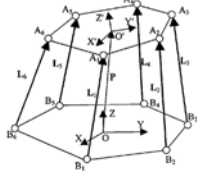
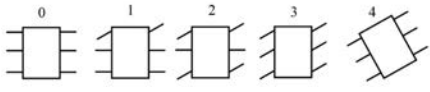
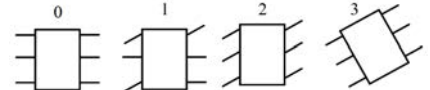
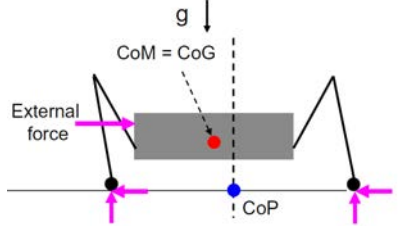
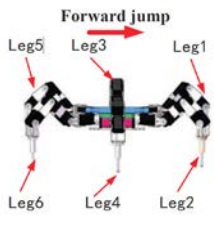
Як наслідок спостерігаються різні принципи, методи і технології синтезу МР та їх застосування на власний розсуд кожним окремим кожен науковцем та/або виробником.

Висновки. Досягнення сучасності у галузі синтезу МР можна вважати вагомими, даний факт можна підтвердити роботами, як вітчизняних, так і світових науковців. Проаналізувавши їхні роботи, стає очевидним, що всі МР різні принципи побудови та алгоритми роботи і керування, точність, швидкість, функціональне призначення та можливості. Для систематизації розглянутих МР у даній роботі було проведено класифікацію крокуючих МР за конструктивними особливостями, описом руху, алгоритмом керування та за функціональним призначенням.

Зроблені висновки щодо сучасного стану проблеми синтезу МР, показують, що на сьогодні відсутній системний підхід щодо їх синтезу, проте спостерігається позитивна тенденція яка проявляється у спробах створення теоретичної основи для опису методики параметричного синтезу МР та використання ідентичних математичних апаратів для задач кінематики та опису динаміки.

Види та класифікація крокуючих МР

Критерій	Типова ознака	Назва/Приклад/Галузь застосування	
1	2	3	
	Кількість кінцівок [4–25]	4 кінцівки – «Квадропод»	
		6 кінцівок – «Гексапод»	
		8 кінцівок «Октопод»	
Конструктивні особливості	Форма тіла [7–12, 21]	Колоподібна – «Гексагональна конструкція»	
		Багатокутна	
		Прямокутна	

Критерій	Типова ознака	Назва/Приклад/Галузь застосування	
Опис руху	Кінематика	Денавіта-Хартгенберга [17–21]	${}^{i-1}T_i = \begin{bmatrix} \cos \theta_i & -\sin \theta_i \cos \alpha_i & \sin \theta_i \sin \alpha_i & a_i \cos \theta_i \\ \sin \theta_i & \cos \theta_i \cos \alpha_i & -\cos \theta_i \sin \alpha_i & a_i \sin \theta_i \\ 0 & \sin \alpha_i & \cos \alpha_i & d_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$
		Платформа Стюарта [23–25]	
	Динаміка [10, 11, 16, 18, 19]	Рівняння Лагранжа	$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial T}{\partial \dot{q}_i} \right) - \left(\frac{\partial T}{\partial q_i} \right) = Q_{q_i}, \quad i = 1 \dots k,$
Алгоритм керування	Пересування / обертання [12–15]	Двонога хода	
		Тринога хода	
	Балансування [22]	Баланс центру тиску	
	Стрибкові рухи [18, 19]	Багатоспрямовані стрибкові рухи	
Функціональне призначення / мета використання	Дослідницька діяльність у важко доступних місцях	Замкнені простори, дослідження небесних тіл, підводні дослідження [1–3, 23]	
	Рятувальні операції	Пошукові роботи під завалами [3]	
	Спостереження та/або охорона території	Спостереження та/або охорона промислової території [22]	
	Логістична	Автоматизація транспортно-складських систем [5]	
	Обслуговування та/або ремонт міської, сільської, промислової інфраструктури	Сільсько- та лісгосподарські роботи, обслуговування ліній електропередач [4–15]	

Список літератури:

1. How Robotics in Logistics Helps Improve Supply Chain Efficiency. URL: <https://www.fingent.com/blog/how-robotics-in-logistics-helps-improve-supply-chain-efficiency/>
2. How are Robots Used in Space Exploration URL: <https://blog.bliley.com/robots-used-in-space-exploration>
3. Хазанович Ю.Ю., Киричук Ю.В., Алгоритм керування крокуючих роботів. *Збірник праць XV Всеукраїнської науково-практичної конференції студентів, аспірантів та молодих вчених “Погляд у майбутнє приладобудування”*, 14-15 червня 2022р. – К.: ПБФ, КПІ ім. Ігоря Сікорського. – 2022. – 213 с.

4. Філяюшкін О. В., Огляд конструкцій крокуючих роботів, «*ЛЮГОС. Мистецтво наукової думки*», 2018. № 1 С. 157-160.
5. Поліщук М. М. Автоматизований синтез мобільних роботів довільної орієнтації в технологічному просторі: дис. д-ра техн. наук: 05.02.02 – Машинознавство / Поліщук Михайло Миколайович – Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського». Київ, 2021. – 377 с.
6. Поліщук М. М. Мобільний робот для обслуговування паркових та лісних деревних масивів. *Науково-практичний журнал Екологічні науки*. 2019. 26. С. 132–137. DOI: <https://doi.org/10.32846/2306-9716-2019-3-26-24>.
7. Polishchuk, M., Parametric synthesis of a mobile robot for servicing park trees, *Міжвідомчий науково-технічний збірник «Адаптивні системи автоматичного управління»*. 2019. № 2 (35).
8. Polishchuk, M., Tkach, M., Parkhomey I., Boiko J., Eromenko O., 2020. Walking Mobile Robot for Trimming Trees: Design and Modeling. *International Journal of Control and Automation*. 13, 02 (Jun. 2020), pp. 1760 – 1772.
9. Мобільний робот для обрізки дерев: пат. 119633 Україна: МПК А01G 23/00, № а201901310; заявл.11.02.2019; опубл. 10.07.2019, Бюл. №. 13. 4 с.
10. Polishchuk, M., Tkach, M., & Stenin, A. (2022). Anthropomorphic Walking Robot: Design and Simulation. *FME Transactions*, 50(4), pp. 724–731. <https://doi.org/10.5937/fme2204724P>.
11. Крокуючий мобільний робот: пат. № 121432 Україна: МПК В62D57/032, № а201807976; заявл. 18.07.2018. опубл. 25.05.2020, Бюл. № 2. с. 4.
12. Павловський, О. М. Концепція створення керованих автоматизованих крокуючих платформ з чотирма кінцівками. *Вісник КПІ. Серія Приладобудування: збірник наукових праць*. 2020. Вип. 59(1). С. 79–86.
13. Платов, І. М. Гексапод для діагностики складних споруд та інженерних об'єктів. Система живлення. *XVI Всеукраїнська науково-практична конференція студентів, аспірантів та молодих вчених «Ефективність та автоматизація інженерних рішень у приладобудуванні»*, 08-09 грудня 2020 р., м. Київ, Україна: збірник праць конференції. Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2020. С. 37-41.
14. Платов І. М., Павловський О. М. Алгоритм руху автономного робота – гексапода для переміщення у вузьких замкнутих просторах. *Вісник КПІ. Серія Приладобудування : збірник наукових праць*. 2021. Вип. 61(1). С. 61-68. URL: <https://ela.kpi.ua/handle/123456789/46667>.
15. Platov, I. Hexapod movement algorithms to avoid interference. Angular movement. *Вісник КПІ. Серія Приладобудування: збірник наукових праць*. 2021. Вип. 62(2). С. 58-64.
16. S.Yu. Misyurin, G.V. Kreinin, N.Yu. Nosova, A.P. Nelubin, Six-Legged Walking Robot (Hexabot), Kinematics, Dynamics and Motion Optimization, *Procedia Computer Science* 190 (2021), 2020 Annual International Conference on Brain-Inspired Cognitive Architectures for Artificial Intelligence: Eleventh Annual Meeting of the BICA Society, pp. 604–610, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.procs.2021.06.071>.
17. Zihao Yang, Minghai Yuan, Xinhui Shi, Zenan Yang and Mengyuan Li, Mechanism Design and Kinematics Analysis of Spider-like Octopod Robot, *IOP Conf. Series: Journal of Physics: Conf. Series* 1314 (2019) 012109 doi:10.1088/1742-6596/1314/1/012109.
18. Yaguang Zhu, Long Chen, Qiong Liu, Rui Qin, Bo Jin Omnidirectional Jump of a Legged Robot Based on the Behavior Mechanism of a Jumping Spider, *Appl. Sci.* 2018, 8, 51; doi:10.3390/app8010051.
19. Yaguang Zhu, Ziqi Fang, Liang Zhang Dynamic Jump Motion Control of a Jumping Spider Robot with Redundant Degrees of Freedom, 2019, DOI: 10.1109/CAC48633.2019.8996895.
20. Abdelrahman Sayed Sayed, Amr Ahmed Mohamed, Ahmed Magd Aly, Youssef Mohamed Hassan, Abdallah Mahir Abdulaziz, Hossam Hassan Ammar, and Rafaat Shalaby, Experimental Modeling of Hexapod Robot Using Artificial Intelligence A.-E. Hassanien et al. (Eds.): *AICV 2020, AISC 1153*, pp. 26–36, 2020. https://doi.org/10.1007/978-3-030-44289-7_3.
21. Munadi, Ismooyo Haryanto, Toni Prahasto. Analisa Kinematik, Dinamik Dan Metode Gerak Kaki Model Snooper Hexapod Robot, *ROTASI Jurnal Teknik mesin – Vol. 17, No. 3, Juli 2015: 137–144*, DOI: 10.14710/rotasi.17.3.137-144.
22. Kim, JY. Dynamic Balance Control Algorithm of a Six-Legged Walking Robot, Little Crabster. *J Intell Robot Syst* 78, 47–64 (2015). <https://doi.org/10.1007/s10846-014-0074-1>.
23. Santiago Noriega Álvarez, María Camila Rojas, Hernando Leon-Rodriguez, Design and development of a quadruped spider robot. URL: <http://robotics.umng.edu.co/publications/2017-UNIBOSQUE-Design%20and%20development%20of%20a%20quadruped%20spider%20robot.pdf>.
24. Maria Camila Rojas Suárez, Santiago Noriega Álvarez, Bio-Inspired Quadruped Robot For Detection Carbon Dioxide In The Air, URL: https://clawar.org/wp-content/uploads/2020/08/CLAWAR_2018_paper_21.pdf.
25. Ping Ji and Hongtao Wu, "A closed-form forward kinematics solution for the 6-6/sup p/ Stewart platform," in *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, vol. 17, no. 4, pp. 522-526, Aug. 2001, doi: 10.1109/70.954766.

Khazanovych Yu.Yu., Kyrychuk Yu.V., Cherepanska I.Yu. CURRENT STATE OF THE PROBLEM OF THE SYNTHESIS OF WALKING MOBILE ROBOTS

The synthesis of mobile robots (MR) can be considered an actual direction of the development of modern robotics, their characteristic feature is the ability of MR to perform both moving functions similar to human functions, and to implement the planning of movements and their implementation in a three-dimensional indefinite space. Modern achievements in the field of MR synthesis can be considered significant, as this is confirmed by a number of scientific studies, both in domestic and international science, which highlight both the design, work and control algorithms, as well as the functional purpose and capabilities of MR. At the same time, regardless of the significant scientific and real practical achievements in this field, it is possible to claim that the important scientific and technical problem of the construction of the MR has not yet been fully exhausted.

The principles of MR synthesis analyzed in this work allow us to state that there is no general methodological approach. The result is different views of scientists and/or manufacturers regarding the principles, methods and technologies of MR synthesis and their application at their own discretion to solve specific problems. At the same time, this is a marker that the field of MR is in a stage of rapid development.

It should also be noted that a certain positive trend is observed, which is manifested in the attempts of modern scientists to create a theoretical basis for describing the methodology of parametric synthesis of MR and the use of identical mathematical apparatuses for solving the problem of kinematics and the use of Lagrange equations to describe the dynamic model of MR.

Based on the analysis of the latest research and publications carried out in this work, conclusions were made regarding the current state of the problem of MR synthesis. The classification of stepping MRs according to their structural features, functional purpose, mathematical models of dynamics and kinematics, control algorithms and fields of application is also given.

Key words: *walking mobile robot, walking mobile platform, walking mechanisms, quadropod, hexapod, octopus, robospider, robot spider, mathematical model, robotic systems, automation.*

Хорошевська І.О.

Харківський національний економічний університет імені Семена Кузнеця

Алексєєва І.Д.

Харківський національний економічний університет імені Семена Кузнеця

СТВОРЕННЯ МЕТОДИКИ РОЗРОБЛЕННЯ ДИЗАЙНУ МОБІЛЬНОГО ДОДАТКУ ДЛЯ СТАБІЛІЗАЦІЇ ЕМОЦІЙНОГО СТАНУ

У даній статті пропонується інструментарій у вигляді методики для розроблення дизайну мобільного додатку спрямованого на стабілізацію емоційного стану людини. Методика складається з трьох етапів. Для кращого розуміння процесу реалізації кожного з етапів методики, в статті наведено відповідні приклади розрахунків. Перший етап присвячений визначенню найбільш доцільних структурних елементів, що раціонально відтворити в дизайні мобільного додатку. Правильна структурна побудова додатку сприяє підвищенню рівня інтуїтивності та комфортності користування мобільним додатком, його корисності для стабілізації емоційного стану та формування ментального здоров'я користувача. Реалізація даного етапу методики відбувається на основі застосування методу експертного оцінювання. Для визначення ступеня узгодженості думок експертів розраховується значення коефіцієнта конкордації. Як найбільш доцільні для реалізації в структурі мобільного додатку обрані такі елементи: практики йоги, медитації, дихальні вправи, особистий кабінет, щоденник настрою. Другий етап присвячений вибору найбільш доцільного дизайнерського стилю для візуального відтворення інтерфейсу мобільного додатку та його складників. Реалізація цього етапу методики відбувається на основі застосування методу анкетування, а результат візуалізується діаграмою. Як результат, обрано дизайнерський стиль «Мінімалізм». На третьому етапі розкривається питання щодо обрання доцільного колірної та шрифтового рішень для реалізації дизайну додатку. Після показу колірної схеми та шрифту, надається вигляд дизайну вікон мобільного додатку для стабілізації емоційного стану. При цьому візуалізують вікна інтерфейсу саме за обраними структурними елементами на першому етапі методи. Для побудови вікон інтерфейсу мобільного додатку використано середовище Figma. Запропоновані етапи методики можуть бути використані як теоретичний інструментарій при розробленні мобільних додатків, спрямованих на підтримку емоційного стану користувачів у різних сферах. Головною змінною буде вміст елементного складу залежно від конкретної предметної області застосування мобільного додатку.

Ключові слова: мобільний додаток, дизайн, емоційний стан, методика, етапи, кроки, елементи, експерти, дизайнерський стиль, вікна інтерфейсу.

Постановка проблеми. В епоху інформаційного перенасичення та швидкого темпу життя, основною потребою стає досягнення найкращого результату за найкоротший термін. Інтернет-ресурси повинні не просто надавати інформацію, але й виступати в якості помічника.

Сьогодні все більше людей віддає перевагу швидкому доступу до інформації через мобільні пристрої. Все більше користувачів перестають використовувати настільні комп'ютери, віддаючи перевагу мобільним пристроям, які дозволяють бути на зв'язку з усім світом в режимі 24/7.

Мобільні додатки стали невід'ємною частиною життя людей, вони дозволяють швидко отримувати інформацію в будь-який час та в будь-якому місці, що дуже зручно в сучасному світі.

Зараз мобільні пристрої можуть бути використані не лише для зв'язку, також і для освітніх та комерційних цілей. Мобільні додатки знайшли своє застосування в багатьох сферах людської діяльності, вони забезпечують доступ до соціальних мереж та різних онлайн-сервісів, допомагають навчанню, розвитку, веденню здорового способу життя. Наприклад, додатки з фітнес-трекерами дозволяють стежити за кількістю кроків, витраченими калоріями та іншими параметрами здоров'я. Додатки для медитації і релаксації допомагають зняти стрес та покращити емоційний стан.

Емоційний стан людини має значний вплив на її життя, роботу та взаємодію з оточуючим світом. Негативні емоції, такі як стрес, тривога, депресія, емоційні травми, патерни мислення й ін. можуть

негативно впливати на фізичне та психічне здоров'я людини, викликаючи появу та розвиток психосоматичних захворювань [1].

Таким чином, мобільний додаток для стабілізації емоційного стану є важливим інструментом для нормалізації психологічного стану людини, що безпосередньо впливає на її психологічне та фізичне здоров'я.

Одним з найбільш важливих та трудомістких процесів при розробленні мобільного додатку є формування рішень щодо його візуального вигляду, тобто вигляду дизайну мобільного додатка. Вірно продуманий дизайн такого додатка не тільки підвищить мотивацію та залученість до його використання, а й зробить користування мобільним додатком приємним, комфортним, таким, що сприятиме активізації та продукування позитивних емоцій у людини.

Аналіз останніх досліджень і публікацій, присвячених темі розробки дизайну мобільного додатка для стабілізації емоційного стану [2–3], вказує на відсутність чіткого підходу, методики, яка б регламентувала процес створення дизайну такого додатку. Існуючі дослідження фокусуються більше на важливості такого додатку для емоційного здоров'я, описують процес розробки мобільних додатків загалом [4–5], наводять опис, переваги та недоліки конкретних мобільних додатків для підтримки ментального здоров'я [6–9] (наприклад, додатки Headspace, Calm, Balance, MindDoc, Happify, SuperBetter, UpLife, Betterme: Mental Health та ін.). Так, додаток Calm [8] сприяє зниженню тривожності та поліпшенню сну, фокусуючись на медитації, сні, розслабленні. Він містить багато корисних функцій, таких як вправи на дихання, медитацію й ін., однак доцільним була б ще реалізація в інтерфейсі окремого розділу про здоров'я та фізичні вправи. Додаток UpLife [9] містить в собі курси психологічної допомоги та саморозвитку від психологів, базується на принципах когнітивно-поведінкової терапії, включає медитації та практики для внутрішньої трансформації. Проте була б доречною ще реалізація в інтерфейсі функціональної можливості для відслідковування емоційного стану людини протягом дня.

Що стосується дослідження питання розроблення дизайну мобільних додатків, то в публікаціях [10–12] робиться акцент на додатках для iOS та Android та надаються приклади влучних рішень з побудови дизайну додатків. Однак не надаються рекомендації щодо закладання певної логіки при побудові дизайну, процесу прийняття конкретних рішень для вірного відтворення дизайну додатку,

враховуючи спрямованість на конкретну предметну область, реалізацію функцій певних структурних елементів в інтерфейсі та ін.

Отже, в наведених роботах автори торкаються широкого кола питань, однак вони носять більш теоретико-обґрунтовальний та описовий характер або вже пропонується практична реалізація мобільних додатків із певним закладеним функціоналом без розкриття методологічної основи його побудови, особливостей формування та врахування вимог користувачів до структурно-функціонального спрямування дизайну додатку, виокремлення переліку структурних елементів, реалізація яких допоможе сформувати позитивний вплив на фізичне та психологічне здоров'я людини.

Таким чином, питання створення методики для розроблення дизайну мобільного додатка, спрямованого на стабілізацію емоційного стану людини, лишається відкритим і потребує подальшого дослідження.

Постановка завдання. Створення дизайну мобільного додатка, спрямованого на стабілізацію емоційного стану, вимагає систематичного та обґрунтованого підходу. При прийнятті рішення щодо формування дизайну інтерфейсу мобільного додатка для стабілізації емоційного стану потрібно ґрунтовно дослідити потреби цільової аудиторії (що саме є найважливішим для підтримки психологічного та фізичного стану людини), здійснити визначення найбільш важливих структурних елементів, які необхідно реалізувати у мобільному додатку, та реалізувати їх подання в найбільш доречному дизайнерському стилі для додатка даного спрямування.

Таким чином, необхідно розробити методику для створення дизайну мобільного додатку для стабілізації емоційного стану, яка підвищить ступінь обґрунтованості рішень щодо обрання елементного складу додатку та доречного дизайнерського стилю для візуалізації його інтерфейсу.

Метою статті є створення методики розроблення дизайну мобільного додатку для стабілізації емоційного стану людини, яка надає дизайнерам та розробникам чітке структурне уявлення додатку для забезпечення його якісної побудови в певному дизайнерському стилі.

Виклад основного матеріалу. В основі визначення змісту етапів запропонованої методики покладено результати власних досліджень авторів, опубліковані в наступних працях [13–16].

Методика розроблення дизайну мобільного додатку для стабілізації емоційного стану людини містить такі етапи:

Результати оцінювання експертами латентних структурних елементів

Експерти, Q _i	Латентні структурні елементи, LST _j									
	LST ₁	LST ₂	LST ₃	LST ₄	LST ₅	LST ₆	LST ₇	LST ₈	LST ₉	LST ₁₀
Q ₁	8	2	10	9	1	4	3	7	5	6
Q ₂	10	3	8	7	2	6	5	9	4	1
Q ₃	8	7	9	4	5	6	3	10	1	2
Q ₄	10	4	6	9	8	5	2	7	3	1
Q ₅	10	3	9	8	7	1	2	6	5	4
Q ₆	7	1	8	10	9	2	3	6	4	5
Q ₇	9	1	10	8	6	5	4	7	2	3
Q ₈	10	2	9	8	5	6	4	7	3	1
Q ₉	7	1	10	9	6	4	3	8	2	5
Q ₁₀	10	3	7	8	9	2	1	6	4	5
Q ₁₁	10	5	6	7	8	4	3	9	2	1
Q ₁₂	6	1	9	8	7	4	3	10	5	2

етап 1: визначення структурних елементів, що доцільно реалізувати в дизайні мобільного додатку для стабілізації емоційного стану людини;

етап 2: визначення дизайнерського стилю для оформлення додатку;

етап 3: обрання колірної і шрифтової рішення та візуалізація вікон інтерфейсу додатку з визначеними структурними елементами.

Розглянемо змістовне наповнення наведених етапів.

Етап 1. Реалізація даного етапу відбувається в декілька кроків.

Крок 1. На основі дослідження потреб та вимог цільової аудиторії, функціоналу наявних аналогів мобільних додатків для стабілізації емоційного стану та підтримки ментального здоров'я людини [4–9] визначається перелік латентних структурних елементів (LST_j, при j=1, m) для включення в додаток. Такими елементами є: практики йоги (LST₁), гаряча лінія допомоги (LST₂), медитації (LST₃), дихальні вправи (LST₄), особистий кабінет (LST₅), актуальні статті про емоційний стан (LST₆), пошук за ключовими словами (LST₇), щоденник настрою (LST₈), пункт «обране» (LST₉), плейліст з медитаціями та музикою для заспокоєння (LST₁₀).

Крок 2. Здійснюється експертне оцінювання переліку LST_j. Експертам (Q_i, при i=1, n), в якості яких виступало 12 фахівців області розробки дизайну та функціоналу мобільних застосунків, було запропоновано здійснити бальне оцінювання латентних структурних елементів із врахуванням їх важливості в такому додатку. Для оцінювання пропонувалась шкала від 1 до 10 балів (за ступенем збільшення важливості). Результати оцінювання наведено в табл. 1.

Крок 3. Здійснюється перевірка ступеня узгодженості думок експертів під час оцінювання еле-

ментів LST_j. Для цього ведеться розрахунок коефіцієнта конкордації (K) за формулою (1):

$$K = 12 \sum_{j=1}^m [SUM_j - SUM_{sr}]^2 / n^2 (m^3 - m), \quad (1)$$

де SUM_j – сума балів (оцінок), надана j-му елементу від i-x експертів;

SUM_{sr} – середнє значення за SUM_j;

n – кількість експертів, при i=1, n;

m – кількість оцінюваних елементів, при j=1, m.

Розрахунок SUM_j та SUM_{sr} ведеться за формулами (2):

$$SUM_j = \sum_{i=1}^n x_{ij} \quad \text{та} \quad SUM_{sr} = \sum_{j=1}^m SUM_j / m, \quad (2)$$

де x_{ij} – бал (оцінка) від i-го експерта для j-го латентного елемента.

Фрагмент проміжних розрахунків наведено в табл. 2.

Розраховане за формулою (1) значення коефіцієнта конкордації «K» дорівнює 0,69, що свідчить про гарну узгодженість думок експертів під час проведення оцінювання. Тому робиться висновок, про доцільність подальшого роботи з оцінками, що були наведені в табл. 1.

Крок 4. Визначаються коефіцієнти ваги латентних структурних елементів та приймається рішення про найбільш доцільні елементи для реалізації в дизайні мобільного додатку. Коефіцієнти ваги V_j розраховуються за формулою (3):

$$V_j = SUM_j / \sum_{j=1}^m SUM_j, \quad (3)$$

де V_j – коефіцієнт ваги j-го латентного структурного елемента.

Розраховані значення ваги подані в табл. 3.

У якості найбільш вагомих елементів будемо визначати такі елементи, що задовольняють умові, наведеної в формулі (4):

$$V_j > 1 / m. \quad (4)$$

Таблиця 2

Фрагмент проміжних розрахунків

Показники \ Елементи	LST ₁	LST ₂	LST ₃	LST ₄	...	LST ₁₀
SUM _j	105	33	101	95		36
$\sum_{j=1}^m \text{SUM}_j$	660					
SUM _{sr}	66					
[SUM _j - SUM _{sr}]	39	-33	35	29	...	-30
[SUM _j - SUM _{sr}] ²	1521	1089	1225	841	...	900
$12 \sum_{j=1}^m [\text{SUM}_j - \text{SUM}_{sr}]^2$	97992					
$n^2(m^3 - m)$	142560					
K	0,687374					

Таблиця 3

Вага латентних структурних елементів

Елементи \ Вага	LST ₁	LST ₂	LST ₃	LST ₄	LST ₅	LST ₆	LST ₇	LST ₈	LST ₉	LST ₁₀
V _i	0,159	0,050	0,153	0,144	0,111	0,074	0,055	0,139	0,061	0,055

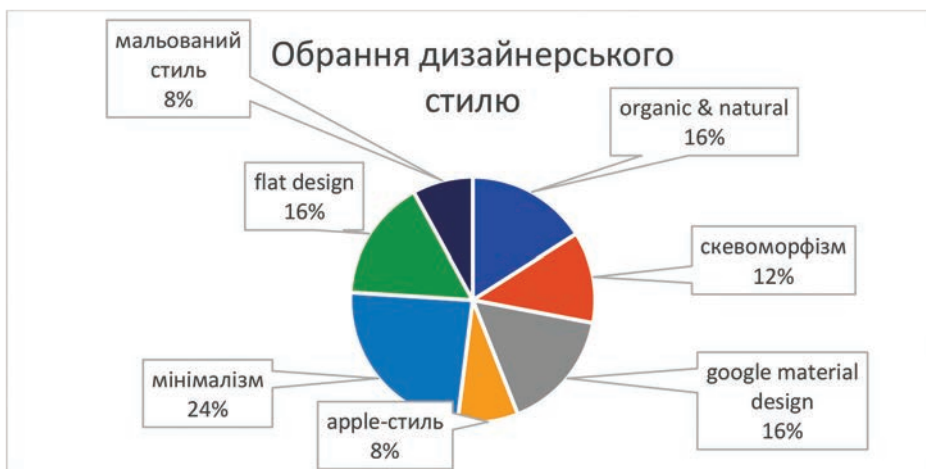


Рис. 1. Результати опитування респондентів

Отже, при кількості структурних елементів $m = 10$, порогове значення $V_j: 1/10 = 0,1$, що говорить про доцільність обрання серед множини латентних, конкретних елементів для їх реалізації в дизайні мобільного додатка. Такими елементами стали: LST₁, LST₃, LST₄, LST₅, LST₈.

Метою експертизи даного етапу було виявлення найбільш важливих із пропонованих структурних елементів для їх відтворення в дизайні мобільного додатку та потім при його подальшій практичній реалізації.

Етап 2. Процес визначення найбільш доцільного дизайнерського стилю для оформлення інтерфейсу мобільного додатку базується на використанні методу анкетування, реалізація якого відбувається за допомогою спеціально розроблених гугл-анкет. Респондентам (в кількості 25 осіб, якими були: студенти, викладачі, дизайнери та ін.) було запропоновано відповісти на таке питання: «Якому з дизайнерських стилів Ви б віддали перевагу для його реалізації при побудові дизайну інтерфейсу мобільного додатку для стабілізації»

емоційного стану?». Короткий опис та приклад стилів додавався.

В якості альтернатив для вибору пропонувалися такі стилі: organic & natural, сквоморфізм, google material design, apple-стиль, мінімалізм, flat design, мальований стиль. Перелік стилів був окреслений на основі аналізу їх популярності [17–19]. Результати опитування респондентів щодо найбільш доцільного стилю для реалізації дизайну додатку подані на рис. 1.

Отже, на основі результатів анкетування найбільш доцільним дизайнерським стилем для реалізації дизайну інтерфейсу мобільного додатку для стабілізації емоційного стану був обраний стиль «мінімалізм» (24%). Основні признаки стилю включають простоту – мінімальну кількість деталей з акцентом на лаконічність і чистоту, обмежену палітру нейтральних кольорів, округлі обтінні форми та прості чисті шрифти.

Етап 3. Правильно обраний колір та шрифт можуть сприяти продукуванню позитивних емоцій та зробити користування додатком приємним та ефективним для користувача. Вибір кольорів для додатку даного спрямування є важливою частиною створення атмосфери спокою і релаксації. Колір має великий вплив на наші емоції та настрої, тому для оформлення інтерфейсу доцільно обрати світлу кольорову гамму з використанням блакитних, фіолетових і сірих відтінків. Блакитний колір часто пов'язують зі спокоєм, гармонією та миром. Він створює відчуття безпеки і релаксації. Фіолетовий колір асоціюється з містикою, мрійливістю та розслабленістю. Він продукує відчуття глибини. Сірий колір є більш нейтральним і спокійним. Він формує відчуття стабільності та зосередженості. На рис. 2. наведено кольорову схему, що пропонується для мобільного додатку.



Рис. 2. Обрана кольорова схема

Для оформлення тексту обрано системний шрифт IOS «SF Pro». Це вже звичний оку шрифт, тому він викликає у користувача довіру. Було створено декілька текстових стилів: накреслення «Bold», розмір 24 Пт; накреслення «Medium», розмір 16 Пт; накреслення «Medium», розмір 12 Пт.

Також, символом додатку була обрана панда. Ці тварини відомі своїм спокійним і мирним характером, їх повільний і незв'язний спосіб руху асоціюється зі спокоєм і релаксацією. Вигляд панд

з їх м'якими обличчями може передати позитивні почуття теплоти і ніжності.

Приклади дизайну вікон інтерфейсу мобільного додатка, що містять визначені на етапі 1 структурні елементи, наведено на рис. 3–7.

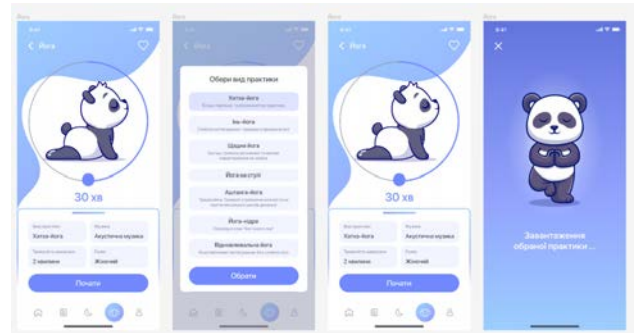


Рис. 3. Дизайн елемента «практики йоги» (LST₁)

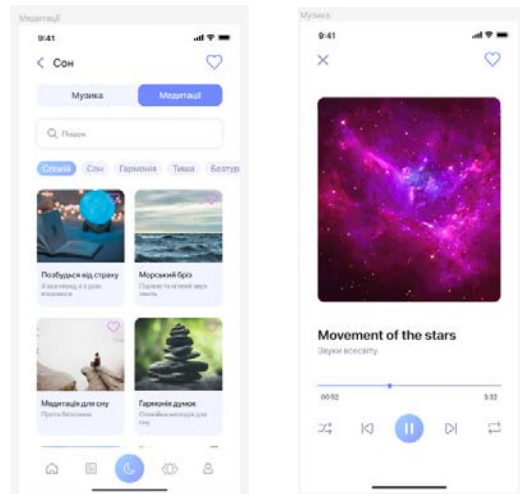


Рис. 4. Дизайн елемента «медитації» (LST₃)

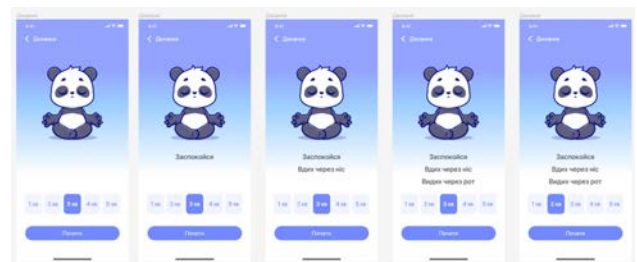


Рис. 5. Дизайн елемента «дихальні вправи» (LST₄)

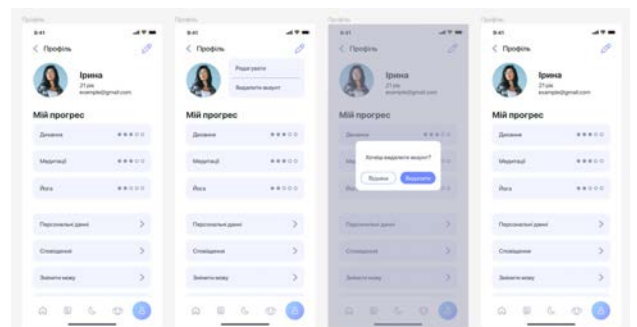


Рис. 6. Дизайн елемента «особистий кабінет» (LST₅)

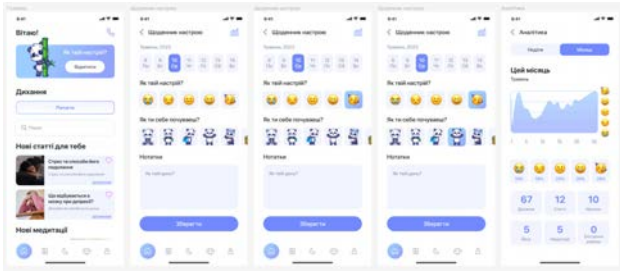


Рис. 7. Дизайн елемента «щоденник настрою» (LST₀)

Розроблення дизайну вікон здійснювалось у середовищі Figma.

Таким чином, визначені на етапі 1 методики структурні елементи були практично реалізовані у дизайні мобільного додатку для стабілізації

емоційного стану людини. Дизайн виконаний в стилі мінімалізм, визначеному на етапі 2, із застосуванням кольорів та шрифту, обраними на етапі 3.

Висновки. В статті наведено методику для розроблення дизайну мобільного додатку для стабілізації емоційного стану людини. Методика дозволяє визначити структурні елементи, що доцільно реалізувати в дизайні мобільного додатку, обрати дизайнерський стиль, колірне та шрифтове рішення для оформлення дизайну інтерфейсу додатку. Використання цієї методики надає можливість для створення функціонально та структурно якісно побудованого дизайну мобільного додатку для зняття стресу, тривоги та підтримки ментального здоров'я людини.

Список літератури:

1. Психосоматичні причини хвороб: взаємозв'язок між психічним та фізичним станами. URL: <https://akwatur.com/blog/psychosomatychni-prychyny-hvorob-vzayemozvyazok-mizh-psyhichnym-ta-fizychnym-stanamy/> (дата звернення 09.08.23).
2. Mental project. Застосунок, який допомагає покращити психічне здоров'я. URL: https://goodface.agency/case/mental_project (дата звернення 14.08.23).
3. Emotionally Intelligent Design: Your Mobile App Needs a Soul. URL: <https://fireart.studio/blog/emotionally-intelligent-design-your-mobile-app-needs-a-soul/> (дата звернення 14.08.23).
4. Behind the Design: Flighty. URL: <https://developer.apple.com/news/?id=970ncww4> (дата звернення 12.08.23).
5. Розробка мобільних додатків від А до Я: повний гайд. URL: <https://dan-it.com.ua/uk/blog/rozrobka-mobilnih-dodatkov-vid-a-do-ya-povnij-gajd/> (дата звернення 16.08.23).
6. Здоров'я: 6 мобільних додатків для підтримки ментального здоров'я. URL: <https://www.wonderzine.com.ua/wonderzine/health/wellness/5843-6-mobilnih-dodatkov-dlya-pidtrimki-mentalnogo-zdorov-ya> (дата звернення 11.08.23).
7. Спокійно: 7 мобільних додатків, які допомагають контролювати психічне здоров'я. URL: <https://zza.delo.ua/know/spokijno-7-mobilnih-dodatkov-jaki-dopomagajut-351102/> (дата звернення 17.08.23).
8. Історія додатку Calm. URL: <https://robibiznes.ukr/teoriya/istoriya-dodatku-calm/> (дата звернення 19.08.23).
9. UpLife - психічне здоров'я. URL: <https://play.google.com/store/apps/details?id=com.olearis.uplife&hl=uk> (дата звернення 22.08.23).
10. Дизайн мобільних застосунків: чому він важливий та де замовити. URL: <https://wezom.com.ua/ua/blog/dizajn-mobilnyh-prilozhenij-pochemu-on-vazhen-i-gde-zakazat> (дата звернення 18.08.23).
11. Дизайн мобільних додатків. URL: <https://kitapp.pro/uk/rozrobka-dizajnu-dodatkov/> (дата звернення 20.08.23).
12. Розробка дизайну мобільних додатків. 7 тонкощів, про які ви повинні знати. URL: <https://artjoker.ua/blog/razrobka-dizayna-mobilnykh-prilozhenij-7-tonkostey-o-kotorykh-vy-dolzhen-znat/> (дата звернення 20.08.23).
13. Ірина Алексеева. Доцільність процесу розробки дизайну мобільного додатку для заспокоєння за допомогою FIGMA. *Матеріали Міжнародної науково-практичної конференції молодих вчених, аспірантів і студентів "Інформаційні технології в сучасному світі: дослідження молодих вчених" 16-17 лютого 2023 р.* Х.: ХНЕУ ім. С. Кузнеця, 2023. Стор. 84.
14. Пушкар О. І., Бондар І. О. Моделювання структурної побудови електронного журналу ігрового спрямування. *Системи обробки інформації*. 2017. № 2 (148). С. 237–241.
15. Хорошевська І.О., Бондар А.В. Розробка методики створення мультимедійного видання «Самовчитель гри на фортепіано». *Вчені записки Таврійського національного університету імені В.І. Вернадського. Серія: технічні науки*. Т.30 (69), №5, 2019. Ч.1. С.185-193. DOI <https://doi.org/10.32838/2663-5941/2019.5-1/30>
16. Хорошевська І.О., Глебов В.О. Економіко-математичне підґрунтя розробки мультимедійного навчального видання «Теорія кольору». Поліграфічні, мультимедійні та web-технології: монографія / ред-

кол.: В.П. Ткаченко, О.В. Вовк, І.Б. Чеботарьова та ін. Харків: ТОВ «Друкарня Мадрид», 2021. С.136-149 с. DOI: 10.30837/978-617-7988-59-4.

17. Найбільш популярні стилі в веб-дизайні. URL: <https://avada-media.ua/ua/stili-web-dizajna/> (дата звернення 05.09.23).

18. Розроблення UX/UI дизайну мобільних додатків. URL: https://learn.ztu.edu.ua/pluginfile.php/242117/mod_resource/content/0/%D0%9B%D0%B5%D0%BA%D1%86%D1%96%D1%8F%205_6.pdf (дата звернення 07.09.23).

Khoroshevska I.O., Aliksieieva I.D. CREATING A METHODOLOGY FOR DEVELOPING A MOBILE APPLICATION DESIGN FOR EMOTIONAL STABILIZATION

This article proposes a toolkit in the format of a methodology for designing a mobile application to stabilize a person's emotional state. The methodology consists of three stages. For a better understanding of the process of implementing each stage of the methodology, the article provides relevant examples of calculations. The first stage is devoted to determining the most appropriate structural elements that can be rationally reproduced in the design of a mobile application. The correct structural construction of the application helps to increase the level of intuitiveness and comfort of using the mobile application, its usefulness for stabilizing the emotional state and forming the mental health of the user. The implementation of this stage of the methodology is based on the expert evaluation method. To determine the degree of consistency of expert opinions, the value of the concordance coefficient is calculated. The following elements have been selected as the most appropriate for implementation in the structure of the mobile application: yoga practices, meditation, breathing exercises, personal account, mood diary. The second stage is devoted to choosing the most appropriate design style for the visual representation of the mobile application interface and its components. The implementation of this stage of the methodology is based on the use of the survey method, and the result is visualized in a diagram. As a result, the Minimalism design style was chosen. The third stage deals with the issue of choosing the appropriate color and font solutions for the application design. After showing the color scheme and font, the design of the mobile application screens is presented to stabilize the emotional state. At the same time, the interface screens are visualized according to the structural elements selected at the first stage. The Figma software was used to build the mobile application interface screens. The suggested stages of the methodology can be used as a theoretical toolkit in the development of mobile applications designed to support the emotional state of users in various fields. The main variable will be the content of the elemental composition depending on the specific subject area of the mobile application.

Key words: mobile application, design, emotional state, methodology, stages, steps, elements, experts, design style, interface screens.

Чумаченко С.М.

ГО Асоціація фахівців цивільного захисту

Попель В.А.

Державний науково-дослідний інститут технологій кібербезпеки та захисту інформації

СИСТЕМНИЙ ПІДХІД ДО АВТОМАТИЗАЦІЇ ПРОЦЕСІВ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ КОМПЕТЕНТНОСТІ ПЕРСОНАЛУ НА ОБ'ЄКТАХ КРИТИЧНОЇ ІНФРАСТРУКТУРИ СИЛ ОБОРОНИ УКРАЇНИ

Публікація присвячена проблемам автоматизації системи підбору та оцінки відповідності персоналу, що має забезпечувати безпеку об'єктів критичної інфраструктури Сил оборони України. В статті розглянуто основні нормативні документи, вимоги до персоналу та шляхи оцінки відповідності його знань, умінь і компетенцій. Враховані вимоги професійних стандартів, розроблених для сфери критичної інфраструктури Сил оборони України та захисту інформації. Ця робота має на меті визначити базові проблеми, пов'язані з підбором кваліфікованого персоналу, оцінки його відповідності та визначення якості роботи в процесах діяльності. Матеріали статті стосуються саме об'єктів критичної інфраструктури Сил оборони України і розглядають особливості, пов'язані з процесами забезпечення безпеки критичної інфраструктури. Результати, отримані в результаті проведеного аналізу проблем персоналу в сфері забезпечення безпеки об'єктів критичної інфраструктури, мають допомогти керівникам установ, організацій, підприємств а також підрозділам HR при формуванні та комплектуванні підрозділів, підготовці та розстановці кадрів. При підготовці публікації розглянуті основні нормативні акти, що регулюють процеси захисту критичної інфраструктури, досвід розвинутих країн, в першу чергу США та Європейського Союзу, стандарти безпеки (ДСТУ ISO/EN 27001, NIST Special Publication 800-181) та рекомендовані практики.

Висновки містять рекомендації щодо автоматизації системи підбору, підготовки та підвищення кваліфікації персоналу в сфері захисту об'єктів критичної інфраструктури, а також її інформаційної та кібербезпеки. Висновки публікації містять рекомендації щодо удосконалення автоматизації процедур підбору та розстановки кадрів, планування підвищення кваліфікації та створення системи професійної підготовки, що базується на системі управління знаннями.

Ключові слова: автоматизація, системи управління, захист критичної інфраструктури, компетентність персоналу, стандарти інформаційної безпеки, знання, навички, компетенції, управління знаннями.

Постановка проблеми. В умовах російської військової агресії до першочергових завдань держави належить забезпечення захисту критичної інфраструктури (КІ) Сил оборони України. Основні засади та принципи захисту КІ визначені Законом України «Про критичну інфраструктуру» [1]. В контексті практичної організації захисту Закон передбачає впровадження автоматизованої системи безпеки КІ Сил оборони України. Її побудова і забезпечення належного рівня захисту стикається з проблемами, що мають безпосередній вплив як на стан безпеки системи, так і на потреби в ресурсах, в тому числі фінансових, що вимагаються для їх вирішення. Однією з найбільш нагальних і ключових в цьому сенсі є проблема компетентності персоналу, що забезпечує захист і відновлення об'єктів інфраструктури. Саме від

рівня компетентності та кваліфікації персоналу залежить як обсяг ресурсів, так і час реагування на інциденти безпеки, що безпосередньо впливає як на обороноздатність країни, так і на якість життя населення.

Захист об'єктів КІ є життєво важливим завданням в умовах військової агресії для Сил оборони України (СОУ). Виняткова потреба в організації захисту критичної інфраструктури знайшла відображення в законодавстві [1, 2, 3]. На даний момент визначено ознаки об'єктів критичної інфраструктури (ОКІ), порядок їх ідентифікації, обліку, об'єднання в сектори управління, встановлений порядок управління кожним сектором, в тому числі в контексті організації захисту визначених об'єктів.

Враховуючи встановлене законом організаційне об'єднання ОКІ СОУ в складну ієрархічну

структуру, яка має призначений державою уповноважений орган у сфері захисту критичної інфраструктури [1], розглянемо актуальні аспекти автоматизації системи підготовки та підвищення компетентності персоналу, задіяного в забезпеченні захисту як окремих ОКІ, так і всієї СКІ в цілому.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Система кадрового менеджменту, на думку класиків цього напрямку досліджень, діяльності та використання (Армстронг, Барнард, Друкер, Карлоф, Маслоу, Мескон, Тейлор, Фоллет, Файоль та ін.), складається з наступних тісно пов'язаних та залежних один від одного елементів технологій (рис. 1):

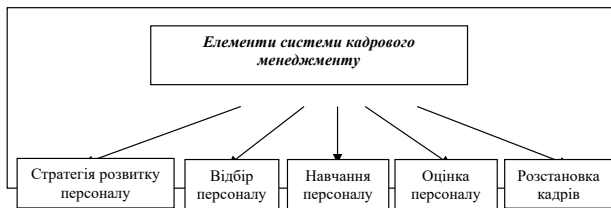


Рис. 1. Складові системи кадрового менеджменту

При цьому, категорично відокремити один від одного елементи системи кадрового менеджменту неможливо. Вони складають єдине ціле, оскільки неможливо здійснити відбір, навчання та розстановку кадрів без оцінювання персоналу; навчання персоналу без відбору та оцінювання; розстановку кадрів без відбору персоналу, його оцінювання та навчання. Тому головною технологією кадрового менеджменту є оцінка персоналу, яка визначає його якість, його придатність до виконання відповідних обов'язків та завдань щодо захисту КІ СОУ.

Поняття «людиноцентризму» знайшло своє відображення спочатку у філософській науці, а пізніше з розвитком системи управління людськими ресурсами було розповсюджене й у кадровому менеджменті.

Як відмічав Президент Академії педагогічних наук України академік В.Г. Кремень, «...філософія людиноцентризму – не лише чергове філософське і антропологічне вчення, а перетворення філософствування з гуманістичних міркувань як таких, в новий тип метафілософії і світогляди, що безпосередньо стосуються вищих сенсів буття, які діють через життя і живе мислення. Звертаючись до проблем духовності, моральності та єдності внутрішнього світу людини, людиноцентризм, як принцип цілісного розуміння особи, відповідає пошукам сучасної соціально-філософської думки.

Людиноцентризм відповідає вимогам і запитах сучасної постіндустріальної цивілізації, яка

шукає людину досвідчену, творчу, ініціативну і у той же час інноваційно мислячу».

Принцип людиноцентричності вже багато років поставлено у центрі діяльності органів управління персоналом, служб персоналу, кадрових органів армій провідних держав світу.

Якісний відбір персоналу СКІ СОУ повинен вирішуватися за допомогою методів, які дають змогу визначити ступінь придатності того чи іншого громадянина до виконання обов'язків професійної діяльності або ступеню його придатності до нової для нього посади. Визначення ступеню придатності (умовної придатності, непридатності) людини (особи) до виконання військово-професійних обов'язків можливе лише при використанні технологій професійного психологічного відбору на військову службу, на нову посаду [4].

Аналіз професійної діяльності здійснюється в рамках професіографії, на підставі професіографічних досліджень, вивчення змісту кожної окремої посади (спеціальності) [11].

Стратегічні підходи до використання технологій кадрового менеджменту у напрямках управління персоналом, управління кар'єрою у військових організаціях держав-членів НАТО використовуються ще з початку ХХ сторіччя.

Система просування по службі в арміях НАТО відпрацьована багатьма роками застосування та відповідною нормативно-правовою базою: у США (1947, 1981), ФРН (1971), Франції (1976), Іспанії (1999), Угорщина (2002) [6-9].

Вся система просування офіцерів Збройних Сил (ЗС) США по службі побудована на культивуванні духу змагання за принципом: чим вище військове звання і посада, тим більш жорсткими повинні бути критерії відбору [9]. Вона, в основному, забезпечує справедливую селекцію в офіцерському корпусі. Суворо дотримуються терміни вислуги в кожному військовому званні. Вважається, що офіцер не може «засиджуватись», не просуваючись службовими сходами, і якщо встановлені терміни перевищені, він повинен бути звільнений у відставку як безперспективний. Так, наприклад, вчиняють з капітаном, який має вислугу більше 16 років (4+два капітанські строки по 6 років), або полковником з 30-річною вислугою (25+5 років максимального полковничого строку), які не мають перспектив подальшого просування по службі. Для отримання чергового військового звання офіцерами у всіх видах ЗС США встановлені єдині мінімальні терміни військової служби (вислуги): для отримання звання 1-го лейте-

нанта – 2 роки, капітана – 4, майора – 10 років, підполковника – 15 років, полковника – 22 роки.

Формуванню якісного та професійного управлінського складу присвячено багато робіт вітчизняних науковців: Г. Атаманчук, Н. Нижник, А. Оболонський, В. Олуйко, Є. Охотський, І. Сурай, О. Турчинов та ін. [10]. Перший поштовх та найбільший вплив на розвиток напрямку створення та забезпечення рівня професіоналізму ланок управління СКІ сприяли роботи класиків менеджменту загалом та кадрового менеджменту зокрема. Класиками даного напрямку є М. Армстронг, М. Вебер, А. Маслоу, С. Тейлор, Є. Мескон, П. Друкер та ін.

Під час досліджень у цьому напрямку були створені перші стандарти професійної служби, які базувалися на «системі заслуг і достоїнств», що, в свою чергу, вимагало визначення та затвердження обліку потрібних ділових та особистісних якостей при призначенні та просуванні на посадах управлінської ланки будь-якого рівня СКІ, незалежно від раси, кольору шкіри, релігії, статі, сімейного стану, віку. Головними критеріями вважалися найбільша компетентність, високі моральні та етичні стандарти.

Служби персоналу держав членів НАТО визнають, що вибір кандидата на посаду СКІ СОУ повинен бути:

- об'єктивним і базуватися на оцінюванні заслуг (досягнень) кожного кандидата;
- конкурентним, але здійснюватися за процесами та показниками, які повинні бути зрозумілими для будь-якого військовослужбовця – солдата, сержанта або офіцера;
- оцінювання кандидата є ключовою частиною відбору як для членів відбіркових комісій, так і для офіцерів, які здійснюють первинний відбір кандидатів у частинах (з'єднаннях);
- відбір повинен враховувати питання щодо індивідуальних, особистісних переваг кандидата для характеру типу діяльності призначення, присвоєння військового звання, направлення на навчання і підготовку [10–12].

Метою статті є наукове обґрунтування застосування сучасних інформаційних технологій автоматизації системи підготовки персоналу для захисту ОКІ СОУ, як невід'ємного органічного доповнення базового інструментарію системи автоматизованого управління безпекою ОКІ.

Виклад основного матеріалу. Вимоги до організаційного забезпечення ОКІ визначені, в тому числі, Постановою КМУ від 19 червня 2019 р. № 518 «Про затвердження Загальних вимог до кіберзахисту об'єктів критичної інфраструктури»

[3, с. 2]. Вимоги передбачають як створення відповідних підрозділів, так і включення до них фахівців, що мають виконати дії щодо забезпечення безпеки ОКІ СОУ. В той же час, на рівні самого об'єкту, досить складно знайти як необхідний персонал, так і визначити ступінь його відповідності та готовності виконання відповідних посадових обов'язків.

При проведенні роботи з підбору та підготовки персоналу важливо чітко розуміти, якими саме знаннями, навичками і компетенціями має володіти фахівець. Зміст такої підготовки витікає з концепції захисту КІ, яка в значній мірі запозичена з досвіду розвинутих країн, що пройшли значний шлях у створенні системи захисту КІ і мають сталий досвід. Загальним підходом в організації захисту ОКІ є те, що захист СКІ базується на системі управління, і, відповідно, на інформаційній інфраструктурі, як основі функціонування будь-якої системи менеджменту. Тому головна практика захисту будується на стандарті ДСТУ ISO/EN 27001 [14], який визначає вимоги до системи управління інформаційної безпеки. Цей стандарт орієнтується, в свою чергу, на ДСТУ ISO/EN 9001, і є по суті системою якості, впровадження якої дозволяє забезпечити захист інформації в організації. Згідно з концепцією стандарту, захисту підлягає та інформація, що визначена організацією, як цінна, а також та, необхідність захисту якої визначено законом. Таким чином, вимоги стандарту, стосуючись інформації, чіпляють всі бізнес-процеси і аспекти діяльності організації, управління організацією, внутрішні та зовнішні взаємодії, технології та персонал. Вимоги до персоналу визначаються в розділі 7 стандарту, і визначають відповідальність організації за забезпечення того, щоб персонал був компетентний, мав відповідну освіту, підготовку або досвід.

У [14] наведено порівняльний аналіз з нормативами і методами в роботі з персоналом в сфері безпеки КІ інших країн, розглянуті кращі практики. Враховані вимоги стандартів, в тому числі ДСТУ ISO/EN 27001 «Інформаційна безпека, кібербезпека та захист конфіденційності – Системи управління інформаційною безпекою – Вимоги», NIST Special Publication 800-181 «Workforce Framework for Cybersecurity (NICE Framework)» [15].

Зокрема, можливо виділити деякі важливі компетенції, знання та навички:

- персонал повинен бути компетентним у виявленні потенційних загроз КІ та вмінні запобігати їм. Це може включати в себе вивчення методів

кіберзахисту, фізичної безпеки та інших аспектів безпеки ОКІ СОУ;

– персонал має бути навчений реагувати на різноманітні інциденти, такі як природні катастрофи, техногенні аварії або кібератаки. Важливо вміти швидко та ефективно реагувати на небезпеку та забезпечити безпеку персоналу і ОКІ СОУ;

– компетентний персонал має знати, як забезпечувати безперебійну роботу ОКІ СОУ в умовах кризи або інциденту. Це може включати в себе роботу з резервними джерелами живлення, водопостачанням, системами охорони, інформаційними технологіями тощо;

– персонал має розуміти закони та нормативні документи, що стосуються безпеки ОКІ СОУ і дотримуватися їх. Невиконання правових вимог може призвести до серйозних юридичних наслідків;

– загрози та технології постійно змінюються, тому персонал має бути готовий до навчання та постійного оновлення своїх знань і навичок, як у сфері безпеки, так і в сфері іншого функціоналу.

Усі ці аспекти, вимоги, напрямки компетентності спрямовані на формування здатності персоналу забезпечити надійну і безпечну роботу ОКІ СОУ та захистити їх від можливих загроз.

Належна підготовка персоналу, що має забезпечити захист критичної інфраструктури, вимагає створення відповідної концепції. Така концепція має забезпечити певну уніфікацію, зокрема, в частині предметної області – забезпечення безпеки ОКІ СОУ, в частині вимог до фахівця – застосування професійних стандартів, в частині процедури – застосувати типові методики та процедури на рівні корпорації – СКІ.

Для застосування найкращих практик в сфері захисту СКІ необхідно враховувати складність проблеми, вимоги до застосовності, гнучкості та рівня узагальнення методик, обмеження в ресурсах, особливо – в часі. В найбільшій мірі, при формуванні системи роботи з персоналом, задачі організації захисту КІ відповідає концепція керування знаннями [17, с. 1–3], оскільки вона має можливість компенсувати ресурсні обмеження більш активним застосуванням інтелектуальної складової. Ця концепція будується на визначенні знань, як цінності і активу, а також врахування в цьому активі практичних навичок, умінь тощо, що мають окремі фахівці ОКІ СОУ. Згідно концепції, знання є важливим елементом ресурсів СКІ, і керування цим ресурсам надасть додаткові можливості при організації дій в екстремальних умовах аварій, тероризму агресора, атаках та ліквідації наслідків на ОКІ СОУ.

Застосування концепції не вимагає створення нових функцій або внесення змін в бізнес процеси. Вбачається, що ця концепція діє на рівні розуміння керівниками (менеджерами) організації головних принципів концепції і застосування цих принципів при проведенні звичної діяльності. До таких можливо віднести:

1. Створення бази знань. Процедура створення знань в значній мірі базується на ідентифікації знань, виділення корисних знань, створення бази знань і доведення цих знань до членів колективу, яких саме ці знання стосуються. Для цього може проводитися пошук і впровадження процесів, які сприяють створенню нових знань. Це може включати в себе стимулювання робочих груп для обміну ідеями, проведення брифінгів та тренінгів для створення бази знань.

2. Ідентифікація та документування знань. Для того, аби забезпечити можливість врахування знань, застосування і керування ними, необхідно визначити знання, по можливості задокументувати – описати, внести до бази знань і пов'язати з процесами та фахівцями. Доцільно долучити до цього процесу весь колектив ОКІ СОУ. Для забезпечення мотивації з боку фахівців доцільно ввести заохочення співробітників ділитися своїми знаннями та досвідом. Документування знань є важливим елементом концепції, оскільки не закріплені у вигляді документів знання легко втрачаються. З метою документування можуть бути застосовані різні інструменти, інструкції, процедури бази знань. В існуючому варіанті це може бути ведення бази даних або внутрішнього порталу для зберігання і поширення інформації для ОКІ СОУ.

3. Поширення і передача знань. Організація має розробити автоматизовану систему навчання, яка враховує і застосовує принципи концепції управління знаннями. Така система може включати створення програми навчання та розвитку, що допомагає співробітникам набувати нові знання та навички, передбачити використання ефективних методів навчання, таких як тренінги, веб-семінари, онлайн-курси і менторство.

4. Знання, як цінний актив, мають бути доступні для тих членів колективу ОКІ СОУ, якими вони можуть бути використані. Для цього необхідних спільний доступ до інформації. Цей доступ може бути організований шляхом створення централізованих інформаційних систем для доступу до інформації та обміну нею між співробітниками, використання захищених мереж або спеціального програмного забезпечення для спільного доступу до ресурсів.

5. Ключовим елементом впровадження концепції управління знаннями є забезпечення мотивації до спільного навчання. Мотивом може бути як матеріальне, так і моральне заохочення, правильно побудована кар'єрна модель, участь в результатах діяльності СКІ. Має бути забезпечено створення мотиваційних систем та нагород для тих, хто активно ділиться знаннями та навчає інших, заохочення колективного навчання та обміну досвідом.

6. Знання, як цінний актив, мають бути захищені. Захист знань може бути забезпечений шляхом впровадження конфіденційності та захисту цінної інформації, розробки політик щодо обмеження доступу до деяких видів знань, запровадження в організації відношень, що включають елемент захисту знань в корпоративній культурі ОКІ.

7. Управління знаннями, як процес, потребує контролю та аналізу. З цією метою можливо запровадити моніторинг і оцінку результатів управління базою знань, включаючи вимірювання впливу здійснених заходів на продуктивність та результати ОКІ СОУ.

8. Культура відношень в колективі ОКІ СОУ (корпоративна культура), є елементом автоматизованої системи управління (включно управління базою знань) і в значній мірі результатом впровадження концепції управління знаннями. Корпоративна культура посилить потенціал організації, якщо буде базуватися на відкритості та співпраці. Менеджмент ОКІ СОУ має стимулювати поширення культури, в якій співробітники відчують, що їхні думки та ідеї важливі і їхній внесок оцінюється. Завдяки цьому відбувається створення сприятливого середовища для обміну ідеями та вільної комунікації.

Управління знаннями в сфері інформаційної безпеки і захисту КІ може стикатися з рядом проблем і викликів. До таких належить швидка зміна технологій і загроз, оскільки сфера безпеки постійно еволюціонує, і нові технології та загрози ОКІ СОУ з'являються дуже швидко. Це ускладнює постійне оновлення знань персоналу та навчання їх новим методам інформаційного захисту, але при цьому підвищує важливість самої задачі безпеки ОКІ СОУ. Деякі члени персоналу можуть не розуміти повністю загрози безпеки або не вважати їх серйозними. Така ситуація може призвести до недостатнього дотримання політик безпеки та правил користування інформацією.

Недостатнє фінансування для навчання та розвитку персоналу у сфері безпеки ОКІ СОУ призводить до систематичного обмеження доступу до

ресурсів та навчальних програм. Недостатнє спілкування, недостатній обмін інформацією та знаннями між різними частинами організації може спричинити недооцінку загроз та втрату можливостей для вчасного реагування на інциденти ОКІ СОУ. Відсутність чітких та ефективних процесів автоматизованого управління базою знань може призвести до плутанини та втрат часу. Різні ОКІ СОУ мають різні корпоративні культури та структури, в організаціях з вищим рівнем ієрархії, як правило складніше реалізувати ініціативи з управління базою знань, які потребують відкритого обміну інформацією. В таблиці 1 наведені приклади застосування концепції управління знаннями на рівні стратегії розвитку організації:

Провідні міжнародні компанії активно впроваджують стратегії управління знаннями, щоб підвищити ефективність, сприяти інноваціям, зміцнити комунікації та поліпшити процеси прийняття рішень. У кожному випадку стратегії адаптуються під конкретні бізнес-процеси та корпоративну культуру компанії, що забезпечує максимальну користь від їх впровадження.

З аналізу матеріалів таблиці 1 випливає, що управління знаннями – це процес створення, розповсюдження, використання та зберігання знань у організації з метою підвищення її спроможності в усіх аспектах діяльності. Дані аналізу свідчать, що сучасні системи управління знаннями, як правило, базуються на застосуванні автоматизованих інформаційних систем, які інтегровані в бізнес-процеси організації. Успішне впровадження стратегії управління знаннями в організації вимагає системного підходу, підтримки керівництва та активної участі всіх співробітників. Правильно обрана і реалізована стратегія управління знаннями є потужним інструментом для підвищення ефективності та досягнення стратегічної мети ОКІ СОУ.

Має бути впроваджена системи моніторингу та оцінки відповідності для всіх ОКІ в системі. Мають також бути розроблені методичні і навчальні матеріали, а також впроваджені заходи сприяння за яких виникне і зможе стало функціонувати система навчання, яка забезпечить підготовку різних фахівців в єдиній парадигмі СКІ.

Сукупність цих заходів формує систему підготовки кадрів загалом для системи захисту КІ. На даний момент до найбільш розвинутих систем захисту критичної інфраструктури належить система, яка успішно функціонує в США. З її детальним описом можливо ознайомитись в документі «Національний план захисту інфраструктури

Застосування системи управління знаннями в організації

№	Компанія	Впроваджена система управління знаннями (СУЗ)	Результати впровадження
1.	Microsoft	власні рішення для управління знаннями, такі як SharePoint та Microsoft Teams	Ці інструменти допомагають командам спільно працювати над проектами, ділитися знаннями та документацією, що підвищує продуктивність роботи
2.	Siemens	впроваджено систему управління знаннями, яка охоплює обмін знаннями, навчання співробітників та співпрацю між різними відділеннями	Організація підвищила інноваційність та забезпечила ефективність розробки нових продуктів. Система сприяє швидкому пошуку та обміну знаннями, поліпшує комунікацію та співробітництво між відділами та різними бізнес-одинацями компанії
3.	IBM	IBM використовує розширену стратегію КМ для підтримки своїх глобальних команд, включаючи форуми, віртуальні спільноти та системи електронного навчання	Це дозволяє компанії швидко адаптуватися до змін ринку, ефективно управляти проектами та підвищувати кваліфікацію співробітників
4.	Daimler AG	розробила спеціалізовану платформу для обміну знаннями та найкращими практиками між власними інженерами та сторонніми розробниками	забезпечено більш ефективне використання інноваційних технологій та рішень в різних проектах та продуктах компанії
5.	Novo Nordisk (Данія)	Novo Nordisk активно інвестує у програми навчання та розвитку для своїх співробітників, в тому числі у внутрішні академії та тренінгові центри	відбувається підвищення кваліфікації та розвиток навичок співробітників, що позитивно впливає на продуктивність та інноваційність компанії
6.	Santander Bank (Іспанія)	банк використовує інструменти аналітики та інтелектуального аналізу даних для кращого збору та обробки інформації про клієнтів, продукти та ринкові тренди	підвищення ефективності в прийнятті рішень, підвищення якості обслуговування клієнтів та оптимізація внутрішніх процесів банку
7.	ABB (Швейцарія)	ABB впроваджує рішення з управління знаннями для інтеграції різних баз даних, систем проектування та інженерних інструментів, щоб сприяти співпраці між фахівцями	більш ефективна координація проектів, скорочення часу на розробку нових продуктів та підвищення якості рішень

(NIPP)» [5] на сайті профільної урядової організації CISA (агентство в структурі Міністерства внутрішньої безпеки США, що відповідає за захист критичної інфраструктури). NIPP – це документ, який визначає стратегічні цілі, пріоритети та підходи до захисту критичної інфраструктури, такої як енергетичні системи, транспорт, комунікації та інші важливі сектори від різних загроз, включаючи кібератаки, природні лиха та терористичні акти. План включає опис структури управління та співробітництва між державними та приватними секторами, а також визначає методи аналізу ризиків та заходи щодо їх зниження. Він регулярно оновлюється, щоб враховувати актуальні загрози та технологічні зміни. Визначає він також і базові вимоги до персоналу, який задіяний при виконанні задач захисту критичної інфраструктури.

Перевага моделі захисту критичної інфраструктури США полягає також в тому, що до неї розроблена серія національних стандартів та рамок (NIST, FISMA та інші), які містять достатній набір вимог та практик для охоплення більшості елементів захисту КІ.

Можливо виділити такі риси цієї системи:

1. Вимоги до кваліфікації, знань та навичок фахівців базуються на стандарті NIST 800-181 «Workforce Framework for Cybersecurity (NICE Framework)» [14].

2. Визначені спеціальності, для яких відповідно до загальних вимог стандарту розробляються професійні стандарти.

3. Для спеціальностей виділені окремі функції, для яких можуть бути створені спеціалізовані навчальні курси, навчання та перевірка знань по яким реалізуються на автоматизованих навчально-тестувальних системах.

4. З метою оцінювання відповідності фахівців застосовуються центри оцінювання, при чому чинними є оцінки як держави, так і деяких недержавних центрів навчання (таких, як Cisco, Microsoft і деяких інших).

Приблизно таку саму модель на даний момент реалізує і Україна. Уповноваженим органом рекомендовані до використання стандарти NIST. На основі стандарту NICE Framework розроблено шість і готується ще п'ятнадцять професійних

стандартів. Створено та акредитовано профільний Кваліфікаційний центр, завданням якого є визначення відповідності кваліфікації вимогам професійних стандартів у сфері інформаційної безпеки. Проводяться системні заходи щодо впровадження інших важливих елементів системи підготовки та оцінювання кадрів для сфери захисту КІ. В самій системі навчання можливе застосування засобів автоматизації. Існує багато навчально-тестувальних систем для безпосереднього та дистанційного навчання. Такі системи функціонують в більшості навчальних закладів, тому наводити детальний опис прикладу немає потреби. Структурна схема опису типової навчально – тестувальної системи наведено на рис. 2.

Головним компонентом такої автоматизованої системи є навчальні курси, які вони пропонують персоналу ОКІ СОУ. Такі навчальні курси мають надавати знання та навички, що відповідають кваліфікаційним вимогам професійних стандартів. Розділення професії на модулі, кожний з яких відповідає певній виробничій функції, дозволить сформувати гнучку систему підвищення кваліфікації, яка може складати 1–2 річні плани, за якими

фахівці отримають можливість без суттєвого відриву від виробництва отримати необхідні знання в повному обсязі.

Такі центри можуть мати централізовану базу знань з методичних матеріалів, накопичувати матеріали екзаменів, бути об’єднані в мережу, містити елементи моніторингу та обробляти статистику навчання, формуючи об’єктивні дані щодо стану професійної готовності персоналу всього сегменту СКІ.

Програмні засоби можуть забезпечити реалізацію сучасних підходів до навчання, включити практику на імітаційних тренажерах, забезпечити елементи системи управління знаннями.

Для поліпшення продуктивності та автоматизації кадрових процесів, перш за все пов’язаних з моніторингом та відбором, підбором і просуванням персоналу ОКІ СОУ, на них створені сотні програмно-аналітичних платформ.

Основою такого програмного забезпечення є аналітичні системи Business intelligence (BI), які визначаються як комп’ютерні методи та інструменти для організацій, що забезпечують переведення транзакційної ділової інформації

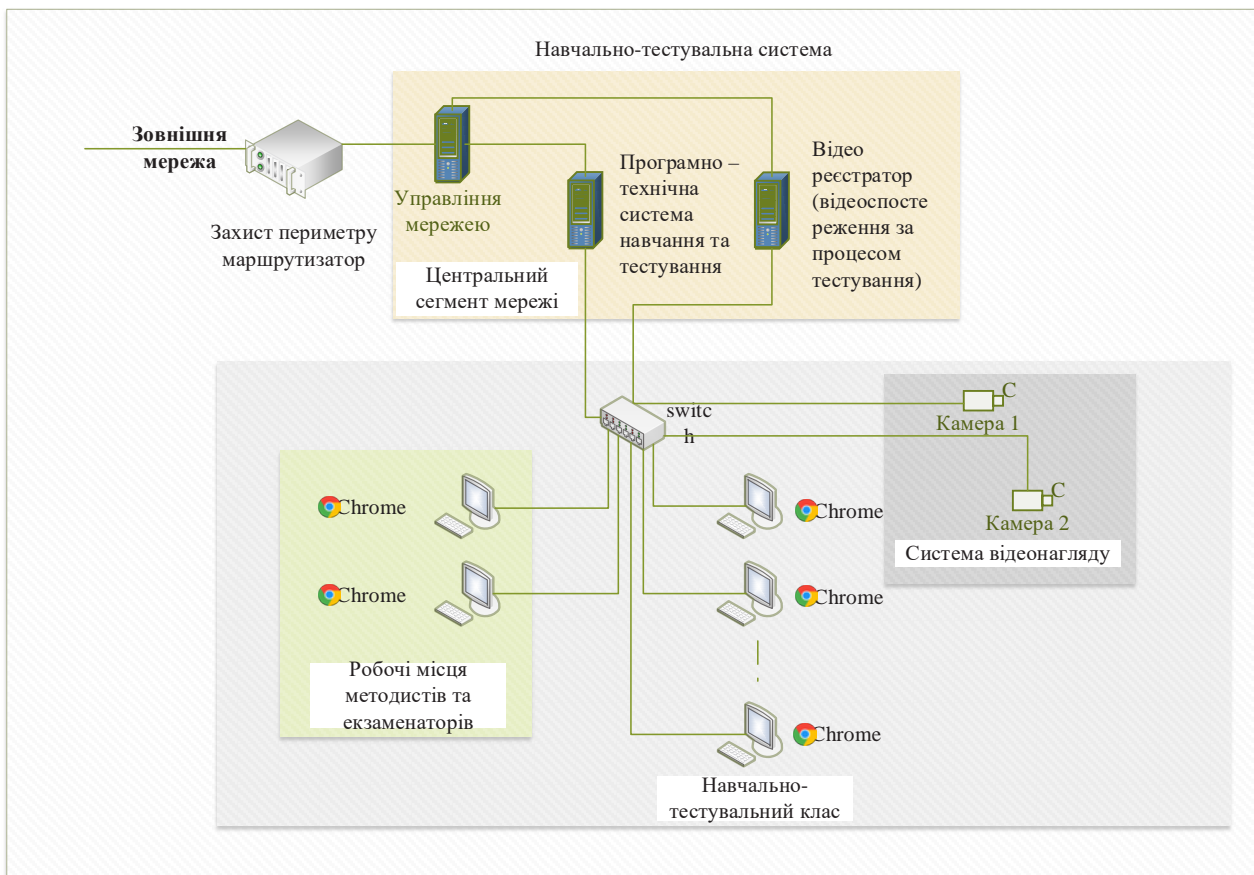


Рис. 2. Структурна схема типового навчально-тестувального центру

в доступну для користувачів форму, придатну для бізнес-аналізу, а також засобів для масової роботи з такою обробленою інформацією [18].

Лідуючі позиції з розробки програмного забезпечення у даній галузі належать відомим провідним компаніям: SAP, ORACLE, ADP, IBM. Також останнім часом у даному процесі задіяно велику кількість нових компаній.

Останніми тенденціями з розробки спеціального програмного-аналітичного забезпечення *Business intelligence* є використання у їх складі передових інформаційних технологій, заснованих на хмарних обчисленнях, що надає переваги у їх використанні на різних типах робочих станцій та мобільних пристроях.

Крім основного переліку функцій з обробки великого масиву даних (*Big Data*), деякі програмно-аналітичні додатки можуть включати наступні можливості на інновації:

1. *Тестування та оцінювання компетентності персоналу* – призначене для попередньої оцінювання знань, умінь, навичок, набутих кваліфікацій претендентів на посаду для вибору кращого з них. Найбільш затребуваним програмним забезпеченням, яке користується попитом у багатьох світових компаніях у даній сфері є програмно-аналітичні платформи та сервіси:

HackerRank – платформа оцінювання рекрутинговими організаціями компетентностей трудових ресурсів для відбору та найму працівників з необхідними якостями;

Rymetrics – сервіс, який використовує неупереджені алгоритми для пошуку підходящих кандидатів, використовуючи гейміфіковані нейробіологічні тести. Сервіс на ринку відносно недавно, але вже добре себе зарекомендував;

Self Management Group – програмно-аналітичне забезпечення для управління набором персоналу з інтегрованою діагностикою та оцінками для залучення, управління та оцінкою кандидатів.

2. *Використання штучного інтелекту*. Використання технологій штучного інтелекту (ШІ) в автоматизованих бізнес-аналітичних процесах. Найкращими сервісами серед яких є:

Ideal – використовує технології ШІ для відбору кандидатів, аналізуючи комплексну інформацію про них: резюме, оцінки та дані про їх результативність;

Textio – глобальна система з уніфікації за єдиним стандартом текстових даних опублікованих резюме кандидатів, написаних за різним поданням та структурою, та автоматичного виправлення можливих граматичних та синтаксичних помилок

у тексті. Головна особливість, яку пропонує система – здатність виявляти закономірності в мові, допомагаючи кадровим органам якісніше проводити відбір кандидатів.

3. Використання *Applicant Tracking Systems (ATS)* – система відстежування кандидатів:

Bullhorn – спеціалізований аналітичний додаток, призначений для пошуку та відбору кандидатів;

SAP SuccessFactors – спеціальне програмне та інформаційно-аналітичне забезпечення для управління людськими ресурсами. Система використовує технології, засновані на методології управління талантами;

iCIMS – комплекс програмного забезпечення для оптимізації роботи кадрових менеджерів, задіяних у процесах рекрутингу персоналу, його просування та управління кар'єрою;

Oracle Taleo Cloud Service – спеціальне програмне та інформаційно-аналітичне забезпечення для пошуку, рекрутингу, просування й утримання кваліфікованих спеціалістів за допомогою багатофункціонального пакета програмного забезпечення;

Workday – програмна система, яка об'єднує бухгалтерський облік, управління персоналом і планування в єдиній хмарній ERP-системі для підвищення ефективності бізнесу;

SmartRecruiters – спеціальне програмне та інформаційно-аналітичне забезпечення, яке за рахунок використання можливостей ШІ і соціальних мереж, дозволяє кадровим менеджерам ефективними способами проводити пошук кандидатів та проводити відбір кваліфікованих спеціалістів у будь-якій частині світу.

Крім вузько направлених у сфері управління персоналом *BI*-систем, існують універсальні системи, можливості яких дозволяють проводити аналіз *Big Data* у будь-якій сфері діяльності. До найбільш потужних засобів бізнес-аналітики, за версією видання Gartner за 2020 і попередні роки, відносяться програмні продукти компаній *Tableau*, *Qlik* і *Power BI*.

Головною їх відмінністю від готових *BI*-рішень є дещо інші підходи до порядку обробки даних, а також їх пристосованість до будь-яких організаційних вимог стосовно побудови та впровадження на автоматизованих робочих місцях інформаційних панелей (*dashboard*).

Інформаційні панелі є складовою частиною *BI*-системи, призначених для візуалізації великого масиву інформації, що аналізується у вигляді графіків, діаграм та інших форм відображення

кількісної інформації, що, в свою чергу, спрощує усвідомлення та допомагає керівництву оцінити реальний стан справ і прийняти обґрунтоване рішення.

Досить функціональним є використання технології in-memory processing (проведення аналізу та обчислень в оперативній пам'яті) та Business Discovery (модуль бізнес досліджень) у програмних продуктах Qlik, яка дозволяє аналізувати бізнес-інформацію на будь-якому рівні, уникаючи трудомістких і дорогих робіт з побудови сховищ і багатовимірних OLAP-кубів. Будь-які обчислення BI-системи Qlik виконуються миттєво навіть при дуже великих обсягах інформації при одночасній роботі великої кількості користувачів, що значно підвищує ефективність роботи. Алгоритми побудови аналітичних моделей, їх переваги та недоліки показані на рис. 3.

Асоціативна архітектура моделі дозволить управляти взаємозв'язками між даними не на прикладному рівні, а на рівні внутрішніх механізмів платформи. Програмний засіб, в якому це реалізовано, зберігає в оперативній пам'яті окремі таблиці даних і асоціативні зв'язки між ними, де кожне значення кожного поля пов'язано з усіма іншими значеннями асоціативної моделі. При створенні нових вибірок, користувач бачить: як дані пов'язані з його запитом, дані, які не входять до вибірки. Це дозволяє користувачеві працювати максимально комфортно, відповідаючи на нові питання самостійно без допомоги фахівців інформаційних технологій [10].

Сервіс Qlik Business Discovery дозволяє аналізувати інформацію у різних інформаційних розрізах (за часом актуалізації) і незалежно від

того, в яких автоматизованих системах управління персоналом дана інформація зберігається, швидко розгортатися та масштабуватися навіть при використанні великої кількості джерел даних, має у своєму складі засоби спільної аналітики у реальному часі.

Особлива увага при побудові BI-систем приділяється їх реалізації. Головна ідея цього етапу полягає в тому, що реалізація системи повинна відбуватись не на заключному етапі її створення, а проводитись паралельно від самого початку створення системи. Провідними світовими компаніями розробниками програмного забезпечення рекомендовано починати розробку з простої версії, швидко її впроваджувати на практиці й поступово покращувати та поширювати автоматизовану систему на основі досвіду, одержаного при взаємодії між користувачем, системою й тим, хто її проектує.

Отже, для багатьох організацій у світі використання BI-систем з обробки великих масивів даних (Big Data), призначених для ефективного управління персоналом, особливо націлених на пошук, відбір і утримання кваліфікованих спеціалістів, дедалі з кожним роком стає нормою, без якої неможливо вести ефективний бізнес для отримання максимальних прибутків.

Використання спеціального програмно-аналітичного забезпечення у діяльності служб персоналу ОКІ СОУ усіх рівнів управління організаційною ієрархією, дозволить вирішити низку проблемних питань, пов'язаних з прискоренням темпів професіоналізації Сил оборони України, підвищення якості укомплектованості, прозорість, об'єктивність та обґрунтованість кадрових

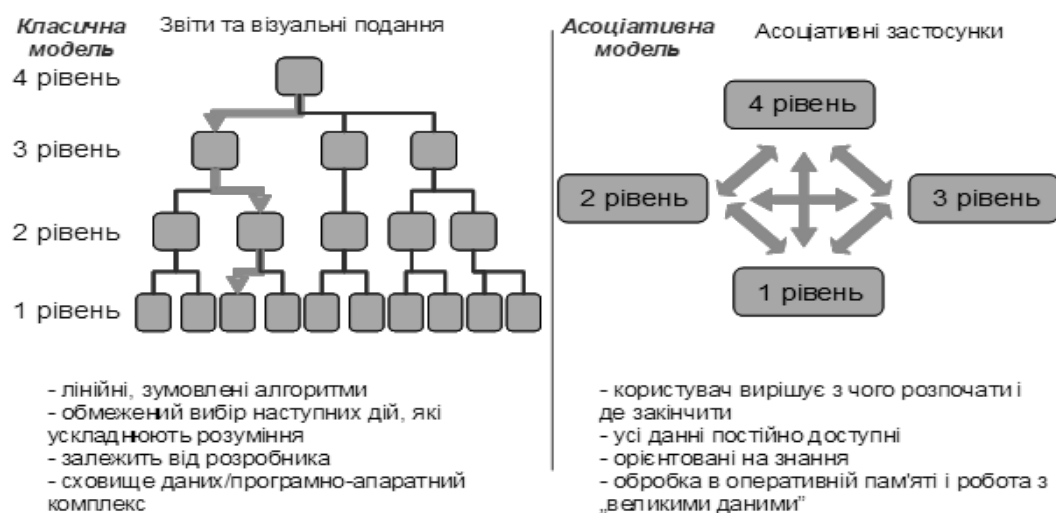


Рис. 3. Алгоритми побудови аналітичних моделей

рішень ОКІ СОУ, якісним відбором та просуванням найкращих кандидатів на ключові посади.

За результатами оцінювання та визначення необхідної кількості кандидатів до Резерву на відповідні посади складається рейтинг (за спеціальностями, спеціалізаціями, посадами, званнями). Рейтинг – список кандидатів, складений за результатами конкурсного відбору за кількісним показником набраних ними балів за принципом від більшого балу до меншого.

При складанні рейтингу необхідно врахувати:

N-ну кількість параметрів (показників, критеріїв оцінювання);

вагу кожного параметру та його можливий вплив на загальний результат;

кількість членів (кількість голосів), які приймають участь у складанні рейтингу;

вагу кожного голосу в залежності від статусу члена комісії (голова, експерт даного напрямку, фахівець вищої категорії за напрямом діяльності, начальник, колега, підлеглий).

За теорією, рейтинг – нижня межа довірчого інтервалу Вільсона для параметру Бернуллі, яка може бути визначена формулою:

$$\left(\hat{p} + \frac{z_{\alpha/2}^2}{2n} \pm z_{\alpha/2} \sqrt{[\hat{p}(1 - \hat{p}) + z_{\alpha/2}^2/4n]/n} \right) / (1 + z_{\alpha/2}^2/n).$$

де: \hat{p} – доля позитивних оцінок; z – квантіль стандартного нормального розподіду (показник, що характеризує розподіл випадкової величини відносно медіани); n – загальна кількість оцінок.

За цією формулою оцінюється нижня межа долі позитивних оцінок при умовах врахування лише позитивних та негативних оцінок (тобто, не беручи до уваги 5-ти бальну систему оцінювання).

Разом з тим, для визначення рейтингу при застосуванні статистичних залежностей може використовуватися й інший математичний апарат, відомий як Байєсовська оцінка (названа іменем

автора Томаса Байєса). Ця оцінка передбачає врахування не лише середнього арифметичного значення оцінок, наданих членами комісії, але і їх кількість:

$$\frac{\text{кол-во голосов}}{\text{кол-во голосов} + n} \times \text{середний балл} + \frac{n}{\text{кол-во голосов} + n} \times 7.2453$$

де 7.2453 – деяка усереднена величина, яка прийнята за основу методу.

Складання рейтингу кандидатів – це головне завдання комісії щодо результатів оцінювання у процесі відбору [15, 19].

Таким чином, існуюча автоматизована система дозволяє забезпечувати укомплектованість особовим складом на необхідному рівні для виконання завдань ОКІ СОУ за призначенням.

Висновки. Таким чином, для успішного управління базою знань в сфері захисту критичної інфраструктури, при впровадженні управління знаннями в якості системи підвищення кваліфікації персоналу СОУ, важливо впроваджувати стратегії, що базуються, з одного боку, на вимогах стандартів [13, 14], з іншого – на впровадженні принципів управління базою знань, як процесу, до якого застосовуються правила керування процесом. Це може включати в себе постійне навчання, створення культури безпеки, співпрацю з іншими організаціями і внутрішнє спілкування, а також вдосконалення процесів управління базою знань.

Впровадження і дотримання правил має забезпечувати і приймати участь керівництво ОКІ СОУ, мають застосовуватися всі можливі технології та технічні засоби, сам процес управління базою знань має бути глибоко інтегрований в бізнес процесу організації.

Персонал має бути мотивований, мати потяг до знань через можливість отримання кар'єрних перспектив та матеріальної винагороди. Перелічені умови, поєднані в автоматизовану систему, дозволять підвищити ефективність діяльності організації і забезпечити захист ОКІ СОУ за умови обмеження в ресурсах.

Список літератури:

1. Закон України Про критичну інфраструктуру. Документ 1882-IX. Редакція від 05.12.2022. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1882-20#Text>
2. Закон України Про основні засади забезпечення кібербезпеки України. Документ 2163-VIII. Редакція від 17.08.2022. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2163-19#Text>
3. Кабінет міністрів України. Постанова від 19 червня 2019 р. № 518 Про затвердження Загальних вимог до кіберзахисту об'єктів критичної інфраструктури. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/518-2019-%D0%BF#Text>
4. Ветров В.І. Модель кадрового менеджменту / В.І. Ветров, О.В. Вранешич// Оборонний вісник. 2020. № 3, С. 16-21.
5. The Army Strategic Planning Guidance 2006-2023. URL: <https://www.hsdl.org/?view&did=443218> (дата звернення: 21.10.2023).
6. Королівський декрет від 28 вересня № 1064/2001, Про ухвалення регламенту процесу оцінювання та просування по службі (документ № 2)

7. Офіційний бюлетень Збройних Сил Франції від 13 листопада № 44 2009 року постійна частина Генеральний штаб. URL: <https://www.defense.gouv.fr/>
8. Про організацію особового складу у Збройних силах Іспанії (документ № 1; глава II розділу VII «Процес оцінювання» і глава I розділу VIII «Порядок підвищення по службі» // Закон від 18 травня № 17/1999. URL: <https://www.defensa.gob.es/ministerio/organigrama/subdef/coperfas/>
9. Дослідження проблем управління кар'єрою військовослужбовців з врахуванням вимог до кандидатів на посади в Збройних Силах України. Звіт про НДР (шифр «Паспорт») – К.: НМЦ КП МОУ, 2018.
10. Наказ від 23.09.1994 № 263/121 Про затвердження Переліку робіт, де є потреба у професійному доборі. БУДСТАНДАРТ Online – нормативні документи будівельної галузі України. URL: http://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page?id_doc=52511 (дата звернення: 21.10.2023).
11. Андреева Т. Мотивація людей на роботі. *Управління персоналом* 2005 №4. С. 12.
12. Оболонський А. В. Кадрова політика у федеральній державній службі США: історія і сучасність. *Громадські науки і сучасність*. 2001. № 3. С. 41 – 61.
13. ДСТУ ISO/IEC 27001:2023 Інформаційна безпека, кібербезпека та захист конфіденційності. Системи керування інформаційною безпекою. Вимоги (ISO/IEC 27001:2022, IDT)
14. Workforce Framework for Cybersecurity (NICE Framework) / R. Petersen та ін. National Institute of Standards and Technology, 2020. URL: <https://doi.org/10.6028/nist.sp.800-181r1> (дата звернення: 19.10.2023).
15. Малихін О. В., Ярмольчук Т. М. Актуальні стратегії навчання у професійній підготовці фахівців з інформаційних технологій. *Інформаційні технології і засоби навчання*. 2020. Т. 76, № 2. С. 43–57. URL: <https://doi.org/10.33407/itlt.v76i2.2682> (дата звернення: 19.10.2023).
16. Пан Л. В., Сисенко Н. В., Абрамович О. К. Концепція управління знаннями як новий напрям менеджменту організацій. *Наукові записки. Том 30. Економічні науки*, 2004. С.97-102
17. 2013 National Infrastructure Protection Plan | CISA. *Cybersecurity and Infrastructure Security Agency CISA*. URL: <https://www.cisa.gov/resources-tools/resources/2013-national-infrastructure-protection-plan> (дата звернення: 19.10.2023).
18. Прокопенко О. С., Рибидайло А. А., Васюхно С. І. Застосування технології контролінгу для управління кар'єрою військовослужбовців. *Збірник наукових праць Центру воєнно-стратегічних досліджень Національного університету оборони України імені Івана Черняхівського*. Київ. 2020. № 1 (68). С. 66–73.

Chumachenko S.M., Popel V.A. A SYSTEMATIC APPROACH TO THE AUTOMATION OF PROCESSES FOR ENSURING PERSONNEL COMPETENCE AT CRITICAL INFRASTRUCTURE FACILITIES OF THE DEFENSE FORCES OF UKRAINE

The publication is devoted to the problems of automating the system of selection and assessment of personnel compliance, which should ensure the safety of critical infrastructure facilities of the Defense Forces of Ukraine.

The article examines the main regulatory documents, requirements for personnel, and ways of assessing the appropriateness of their knowledge, skills, and competencies. The requirements of professional standards developed for the sphere of critical infrastructure of the Defense Forces of Ukraine and information protection are taken into account.

This work aims to identify the basic problems associated with the selection of qualified personnel, assessment of their compliance and determination of the quality of work in activity processes. The materials of the article refer specifically to the critical infrastructure objects of the Defense Forces of Ukraine and consider the features related to the processes of ensuring the security of critical infrastructure.

The results obtained as a result of the analysis of personnel problems in the field of ensuring the safety of critical infrastructure facilities should help the heads of institutions, organizations, enterprises, as well as HR units in the formation and staffing of units, training and placement of personnel.

When preparing the publication, the main normative acts regulating the processes of critical infrastructure protection, the experience of developed countries, primarily the USA and the European Union, security standards (DSTU ISO/EN 27001, NIST Special Publication 800-181) and recommended practices were considered.

The conclusions contain recommendations on the automation of the system of selection, training and advanced training of personnel in the field of protection of critical infrastructure objects, as well as its information and cyber security.

The conclusions of the publication contain recommendations for improving the automation of recruitment and placement procedures, planning professional development, and creating a professional training system based on the knowledge management system.

Key words: automation, management systems, critical infrastructure protection, personnel competence, information security standards, knowledge, skills, competencies, knowledge management.

Яровий О.В.

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

Завгородній В.В.

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

Мухін О.В.

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

РОЗРОБКА ІНФОРМАЦІЙНОЇ ТЕХНОЛОГІЇ УПРАВЛІННЯ МОБІЛЬНИМИ АГЕНТАМИ НА ОСНОВІ МЕРЕЖОЦЕНТРИЧНОГО ПІДХОДУ

Була розроблена нова інформаційна технологія управління мобільними агентами в динамічному середовищі, і ця технологія має низку важливих особливостей та переваг. Перш за все, важливо підкреслити, що наша технологія базується на мережецентричному підході, що робить її унікальною у порівнянні зі звичайними методами управління мобільними агентами. Це означає, що управління агентами відбувається через спільну мережу, де кожен агент може взаємодіяти з іншими та отримувати важливу інформацію для прийняття рішень. Другий аспект цієї технології полягає в її застосуванні у критичних умовах. Це означає, що вона може бути використана в ситуаціях, де надійність та живучість агентів є критичними. Запропонована технологія підвищує стійкість системи до відмов та забезпечує безперервну роботу мобільних агентів.

Отримана інформаційна технологія визначається своєю унікальністю порівняно з традиційними методами управління мобільними агентами. Головною перевагою нашої розробки є її модернізація та пристосування до умов сучасного динамічного середовища та критичних сценаріїв. Традиційні методи управління мобільними агентами мали свої обмеження та були спрямовані переважно на статичні або менш критичні завдання. Запропонована технологія суттєво виходить за межі цих обмежень, завдяки використанню мережецентричного підходу. Вона дозволяє мобільним агентам спілкуватися та координуватися в реальному часі, що робить їх більш адаптованими до змін у середовищі та більш схильними до самоорганізації в критичних ситуаціях.

Застосування розробленої інформаційної технології управління мобільними агентами в динамічному середовищі на основі мережецентричного підходу є важливим кроком у сучасному інформаційному управлінні. Вона може знайти застосування у різних галузях, де важливо забезпечити надійність та ефективність управління мобільними агентами в динамічному та критичному середовищі.

Ключові слова: інформаційна технологія, мобільні агенти, мережецентричний підхід, динамічне середовище, ефективність управління.

Постановка проблеми. Концепція мережецентричного управління є значущим кроком у подоланні недоліків, які спостерігаються при централізованій та децентралізованій моделях управління [1]. Вона вирішує ці проблеми шляхом впровадження нового підходу, який передбачає активну взаємодію та спільну координацію між мобільними агентами у динамічному середовищі. Розглянемо кілька ключових аспектів цієї концепції [2]:

1. Спільна координація: мережецентричний підхід передбачає, що мобільні агенти активно вза-

ємодіють один з одним і координують свою діяльність. Це дозволяє створити спільну інформаційну основу та вирішувати завдання колективно, замість ізольованого управління кожним агентом.

2. Відсутність одного централізованого вузла: немає єдиного центрального контролера, що розподіляє завдання між агентами. Замість цього, обрано вузли, які мають певну частину інформації, та з них обирається центр управління. Це дозволяє системі бути більш адаптивною та стійкою до відмов.

3. Динамічність: один і той же вузол може нести роль центру управління на деякий час, а потім ця роль може переходити до іншого вузла в залежності від обставин і обраної стратегії.

4. Забезпечення живучості: запропонована модель сприяє збереженню функціональності системи в умовах недоступності або виходу з ладу окремих агентів чи вузлів. Це робить систему більш стійкою та здатною працювати в критичних ситуаціях.

Враховуючи ці аспекти, мережецентричний підхід виявляється перевагою у керуванні мобільними агентами в складних умовах. Він дозволяє покращити координацію та ефективність роботи агентів, забезпечуючи високу стійкість та відсутність єдиного точку відмови.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. На сьогодні існує велика кількість праць вітчизняних та закордонних вчених щодо управління мобільними агентами. Зокрема у роботі [3] проведено аналіз сучасних систем автоматизованого управління тактичними безпілотними літальними апаратами; у роботах [4, 5] розглядається дослідження системи управління безпілотних літальних апаратів для комп'ютерного симулятора віртуального квадрокоптера; у роботі [6] розглядаються особливості застосування безпілотних літальних апаратів; робота [7] присвячена розгляду сучасних автоматичних систем управління безпілотними літальними апаратами. Разом з тим, відсутність робіт, спрямованих на управління мобільними агентами на основі мережецентричного підходу, а також інтенсивний розвиток інформаційних технологій, роблять актуальним завдання розробки інформаційної технології управління мобільними агентами на основі мережецентричного підходу.

Метою статті є розробка інформаційної технології управління мобільними агентами на основі мережецентричного підходу.

Виклад основного матеріалу. Інформаційна технологія управління мобільними агентами на основі мережецентричного підходу забезпечує проведення управління мобільними агентами та порівняння його з різними підходами (рис. 1). Вхідними даними є: набір мобільних агентів, параметри мобільних агентів, набір запитів та набір зовнішніх параметрів. Після проходження ініціалізації мобільних агентів та розгортання середовища управління відбувається процес тестування та управління мобільними агентами за допомогою структурної схеми системи управління мобільними агентами [8, 9]. На виході отримуємо наступні показники: час тестування з'єднання для кожного мобільного агента, час проходження всіх запитів, помилки, які виникли при проходженні запитів, список запитів, які відпрацювали з помилками, що може означати непрацюючі компоненти мобільного агента, або відсутність зв'язку з мобільним агентом.

В систему управління мобільними агентами, яка була визначена на рисунку 1 було використано наступні блоки:

- блок перевірки підключення до мобільного агента, який забезпечує перевірку зв'язку з мобільним агентом та визначає роботу всіх інших блоків;
- блок управління запитами до мобільного агента, який забезпечує підготовку, формування та передачу запитів;
- блок перевірки відповідей на запити від мобільних агентів, який контролює кількість надсилань одного запиту та обробку відповіді від на ці запити;

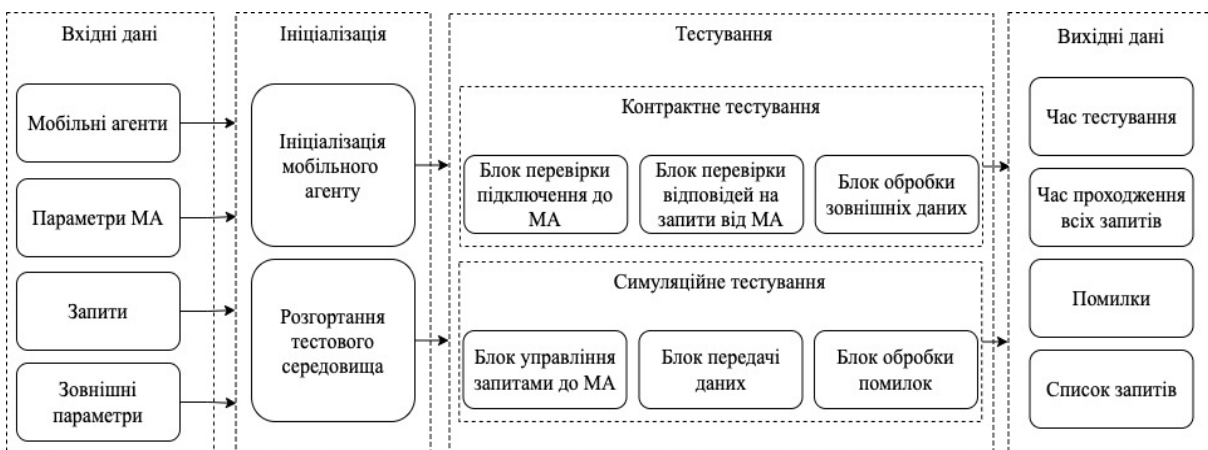


Рис. 1. Схема інформаційної технології тестування систем управління мобільними агентами

– блок передачі даних, який забезпечує передачу даних від центру управління до мобільного агенту;

– блок обробки зовнішніх даних, який забезпечує визначення зовнішніх параметрів впливу та кореляцію запитів відносно цього;

– блок обробки помилок, який допомагає визначити помилки в управлінні та скоригувати систему для більш оптимізованого формування запитів.

На основі інформаційної технології було розроблено нову інформаційну систему, яка складається з чотирьох рівнів виконання: рівень прийняття рішень, рівень управління, рівень передачі даних та рівень мобільних агентів (рис. 2). Рівень прийняття рішень відповідає загальну підготовку та оцінку відповідних завдань для управління мобільними агентами та містить в собі наступні модулі:

– модуль аналітики, який відповідає за проведення аналітичного аналізу ситуації та визначення тих мобільних агентів, які будуть застосовані в тій чи іншій ситуації;

– модуль розробки завдань, опираючись на основі даних, які були підготовлені модулем аналітики формують масив завдань управління

мобільними агентами для передачі його в модуль підготовки запитів;

– модуль підготовки запитів, аналізує масив завдань та відносно них будує масив запитів, який передається до модулю управління чергою запитів в рівні управління;

– модуль координації, який отримує дані з модулю коригування запитів рівня управління та дає відповідні вказівки модулю формування пакетів запитів рівня управління для вставки в чергу нового пакету з скоригованими запитами;

– модуль логування служить для збереження всіх запитів, які були згенеровані модулем підготовки запитів та пакетів модулем координації.

На рівні управління, який відповідає за обробку запитів та відповідей від мобільних агентів є наступні модулі:

– модуль управління чергою запитів, який отримує дані від модулю підготовки запитів рівня підготовки та проводить вибірку запитів, які стосуються окремого мобільного агента з подальшою передачею їх в модуль формування пакету запитів;

– модуль формування пакету запитів, після отримання запитів готує пакет управління для

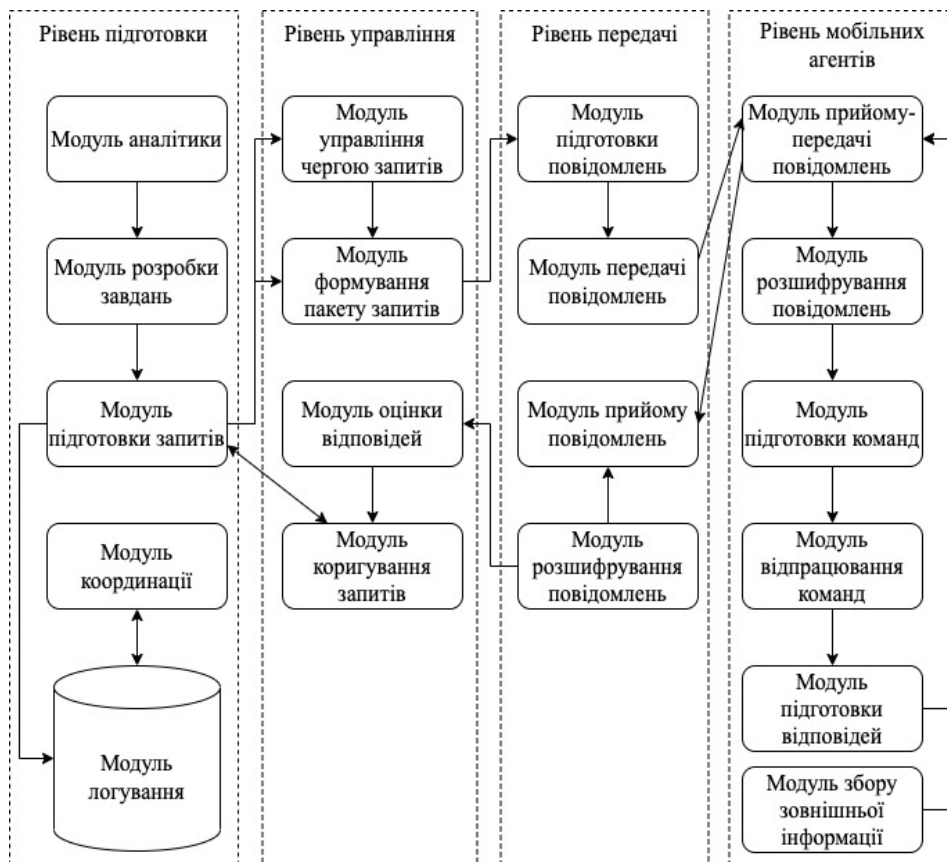


Рис. 2. Функціональна схема інформаційної системи підвищення ефективності управління мобільними агентами

конкретного пристрою та передає його в модуль підготовки повідомлень рівня передачі;

- модуль оцінки відповідей, який отримує розшифровану відповідь від модулю розшифрування повідомлень рівня передачі та проводить попередню оцінку про проходження запитів та про особливості зовнішніх факторів впливу, які передав модуль збору зовнішньої інформації рівня мобільного агента;

- модуль коригування запитів ґрунтуючись на даних, які передаються з модулю оцінки відповідей проводить остаточну оцінку та визначає запити, які повинні бути відредаговані або заново запущені для виконання та передає дану інформацію в модуль координації рівня підготовки. При необхідності рівень підготовки направляє на допрацювання відповідні запити після їх оцінки.

Рівень передачі даних містить у собі чотири модуля, а саме:

- модуль підготовки повідомлень, який отримавши пакет запиту від модулю формування пакетів запитів рівня управління, проходить його шифрування та передає його в модуль передачі повідомлень;

- модуль передачі повідомлень отримує зашифроване повідомлення від модулю підготовки повідомлень та передає його в модуль прийому-передачі повідомлень рівня мобільного агента;

- модуль прийому повідомлень приймає від модулю прийому-передачі повідомлень рівня мобільного агента відповідь мобільного агента та передає його для розшифрування в модуль розшифрування запитів;

- модуль розшифрування повідомлень проходить розшифрування повідомлень, які йому надійшли з модулю прийому повідомлень та передає відповідь в модуль оцінки відповідей рівня управління.

Рівень мобільного агента відповідає за процеси, які відбуваються в мобільних агентах та поділяється на наступні модулі:

- модуль прийому-передачі повідомлень, який приймає повідомлення від модулю передачі повідомлень рівня передачі та відправляє повідомлення модулю прийому повідомлень рівня передачі. При формуванні відповіді враховуються дані, які були отримані з модулю підготовки відповідей та модулю збору зовнішньої інформації;

- модуль розшифрування повідомлень отримує дані з модулю прийому-передачі повідомлень та проводить розшифрування повідомлень з подальшою передачею в модуль підготовки команд;

- модуль підготовки команд проводить перетворення запитів на команди для мобільного агента та передає їх в модуль відпрацювання команд;

- модуль відпрацювання команд, застосовує команди, які він отримав з модулю підготовки команд та після їх виконання передає дані в модуль підготовки відповідей;

- модуль підготовки відповідей отримавши набір результатів виконання команд проводить формування пакетів відповідей та передає їх до модулю прийому-передачі повідомлень для подальшої відправки;

- модуль збору зовнішньої інформації потрібен для обробки інформації з датчиків мобільного агента та підготовку пакету відповіді для передавання його в модуль прийому-передачі повідомлень для подальшої відправки.

Дана інформаційна система дозволяє підвищити ефективність управління мобільними агентами з можливістю застосування мережецентричного керування. Отримані результати зберігаються у базі знань, яка ведеться в модулі логування. На основі знайдених помилок та оцінки зовнішніх факторів проводиться координація роботи мобільних агентів для вирішення тієї чи іншої задачі.

Висновки. Таким чином, здійснено побудову нової інформаційної технології управління мобільними агентами в динамічному середовищі на основі застосування мережецентричного підходу. Розроблена технологія також слугує модернізацією традиційних інформаційних технологій керування, переносючи їх на новий рівень. Вона використовує передові засоби для обробки даних, мережевої комунікації та аналізу, що підвищує їхню ефективність та точність. Це дозволяє покращити якість управління мобільними агентами та забезпечити більшу надійність у важких умовах.

Запропонована технологія відкриває нові перспективи для впровадження мережецентричного управління мобільними агентами, забезпечуючи підвищену їхню живучість. Вона може знайти застосування у сферах, де критичність та швидкість реакції є важливими факторами, таких як автономні роботи, розподілена мережа зв'язку та інші сценарії. Таким чином, наша технологія становить значущий крок уперед у розвитку управління мобільними агентами та їхнього успішного функціонування в вимогливих умовах.

Список літератури:

1. Liu Feng, Guo Wei-Wei. Research and Design of Task Scheduling Method Based on Grid Computing. *International Conference on Smart City and Systems Engineering (ICSCSE)*. 2017. Changsha, China. P. 188–192. DOI: <https://doi.org/10.1109/ICSCSE.2017.54>
2. Younis M.T., Yang S., Passow B.N. A Loosely Coupled Hybrid Meta-Heuristic Algorithm for the Static Independent Task Scheduling Problem in Grid Computing. *IEEE Congress on Evolutionary Computation (CEC)*. 2018. P. 1–8. DOI: <https://doi.org/10.1109/CEC.2018.8477765>
3. Ткачук П.П., Сальник Ю.П., Пащук Ю.М., Малата І.В. Система автоматизованого управління польотом і корисним навантаженням тактичних безпілотних літальних апаратів. *Військово-технічний збірник*, № 10, 2014. С. 73–77. DOI: <https://doi.org/10.33577/2312-4458.10.2014.73-77>
4. Подорожняк А.О., Волоцков Є.А., Шевцова О.С. Дослідження системи управління безпілотних літальних апаратів. *Сучасні інформаційні системи*. 2018. Т. 2, No 3. С. 97-101. DOI: <https://doi.org/10.20998/82522-9052.2018.3.16>
5. Walid M., Slaheddine N., Mohamed A., Lamjed B. Modeling and control of a quadrotor UAV. *15th International Conference on Sciences and Techniques of Automatic Control and Computer Engineering (STA)*, Hammamet, 2014, pp. 343-348. DOI: <https://doi.org/10.1109/STA.2014.7086762>
6. Особливості застосування безпілотних літальних апаратів органами та підрозділами поліції: метод. рек. / А. А. Саковський, С. М. Науменко, С. І. Кравченко, І. М. Єфіменко та ін. Київ: Нац. акад. внутр. справ. 2022. 72 с.
7. Радзівілов Г.Д., Фесенко О.Д. Аналіз системи автоматичного управління маршрутом польотом безпілотним літальним апаратом. *Східноєвропейський науковий журнал*. № 12 (28), Ч. 2, 2017. С. 45–48. URL: https://eesa-journal.com/wp-content/uploads/EESA_28_2.pdf
8. Zavgorodnii V., Braykovska N., Yarovy O., Zavgorodnya A., Liskin V., Mukhin O. The Method of Restoring Parameters of Mobile Agents in a Unified Dynamic Environment Considering Similarity Coefficients, *International Journal of Computer Network and Information Security (IJCNIS)*. Vol. 15, No. 4, pp. 25–35, 2023. DOI: <https://doi.org/10.5815/ijcnis.2023.04.03>
9. Яровий О.В., Завгородній В.В. Розробка структурної схеми системи управління мобільними агентами. *Науковий журнал «Вчені записки ТНУ імені В.І. Вернадського. Серія: Технічні науки»*. Том 34 (73), No 4, 2023. С. 124–128. DOI: <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2023.4/20>

Yarovy O.V., Zavgorodnii V.V., Mukhin O.V. DEVELOPMENT OF INFORMATION TECHNOLOGY FOR MOBILE AGENTS MANAGEMENT BASED ON A NETWORK-CENTRIC APPROACH

A new information technology for managing mobile agents in a dynamic environment has been developed, and this technology has a number of important features and advantages. First of all, it is important to emphasize that our technology is based on a network-centric approach, which makes it unique compared to conventional methods of managing mobile agents. This means that the management of agents takes place through a shared network, where each agent can interact with others and receive important information for decision-making. The second aspect of this technology is its application in critical conditions. This means that it can be used in situations where the reliability and survivability of agents are critical. The proposed technology increases the system's resistance to failures and ensures continuous operation of mobile agents.

The resulting information technology is determined by its uniqueness compared to traditional methods of managing mobile agents. The main advantage of our development is its modernization and adaptation to the conditions of the modern dynamic environment and critical scenarios. Traditional methods of managing mobile agents had their limitations and were mainly aimed at static or less critical tasks. The proposed technology significantly goes beyond these limitations, thanks to the use of a network-centric approach. It allows mobile agents to communicate and coordinate in real time, making them more adaptable to changes in the environment and more prone to self-organization in critical situations.

Application of the developed information technology for managing mobile agents in a dynamic environment based on a network-centric approach is an important step in modern information management. It can be used in various industries where it is important to ensure the reliability and efficiency of managing mobile agents in a dynamic and critical environment.

Key words: *information technology, mobile agents, network-centric approach, dynamic environment, management efficiency.*

ЕНЕРГЕТИКА

УДК 662.951.23

DOI <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2023.5/44>**Абдулін М.З.**Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»**Куник А.А.**Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

ШЛЯХИ СТВОРЕННЯ УНІВЕРСАЛЬНИХ ТА КОМБІНОВАНИХ ПАЛЬНИКОВИХ ПРИЛАДІВ

У статті представлено результати порівняльного аналізу різних підходів до організації ефективного спалювання різних видів палива використовуючи один пальниковий прилад.

На багатьох вогнетехнічних енергетичних об'єктах передбачено використання кількох видів палива наприклад природного газу в якості основного, пропан-бутану в якості резервного, а мазуту, як аварійного. Проте на сьогоднішній час існує проблема однаково ефективної організації топкового процесу одним пальниковим приладом для різних видів палива. Для вирішення даної проблеми вже довгий час спеціалісти працюють над розробленням універсальної технології спалювання і як наступний логічний крок, над впровадженням універсального пальникового приладу.

Проаналізовані дослідження показують, що позитивного ефекту можна досягти й за допомогою спалювання сумішей водневих палив, за рахунок приведення різних видів палив до подібної теплоти спалювання, числа Воббе та решти фізико-хімічних характеристик.

У статті досліджено існуючі напрацювання в розвитку спалювання, створення технологій універсальних пальникових приладів та досвіду спалювання водневих паливних сумішей. Проведено порівняльний аналіз, в ході якого було проаналізовано попередні дослідження, та як результат - виділено два підходи до організації ефективної роботи вогнетехнічного об'єкту на кількох видах палива. Після чого, отримано висновки, про те, що обидва цих підходи є потенційно корисними та актуальними і подальші роботи повинні вестися в обох напрямках.

Ключові слова: воднева енергетика, комбіновані пальники, струменеве-нишева технологія, універсальна технологія спалювання, аварійне та резервне паливо.

Постановка проблеми. Нестабільна ситуація в енергетичній сфері штовхає до пошуку шляхів для забезпечення ефективного спалювання різних видів палива за допомогою одного пальникового приладу. При цьому необхідно забезпечити однакову ефективність робочого процесу пальникового приладу, без внесення вагомих змін у функціонування паливної інфраструктури та вогнетехнічного об'єкту в цілому.

З точки зору технологічних процесів, надійності та економічності, завжди вигідно мати влюбий момент можливість тимчасово перейти на інший вид палива. Така необхідність може виникати у випадку проблем з постачанням основного палива. Наприклад, при пошкодженні магістрального газопроводу природного газу, районна котельня починає використовувати пропан-бутан

з газгольдера, поповнюючи його запаси за допомогою автоцистерн чи залізницею. Або ще один приклад: відбувається коливання на ринку природного газу, в зв'язку з чим, постачальники піднімають ціни, тому цукровому заводу в цьому сезоні вигідніше використовувати пропан-бутан, для підсвітки бурякового жому, як основного палива.

Така проблема завжди залишатиметься актуальною, адже більшість критичних вогнетехнічних об'єктів, по закону чи регламенту управляючої компанії зобов'язані мати резервне та аварійне паливне господарство. При чому палива повинні відрізнятися від основного. Так, наприклад пункт 7.2 ДБН В.2.5-77:2014 «Котельні» передбачає обов'язкову наявність резервного палива для котельних потужністю більше ніж 25 МВт, при чому наказується розглядати ці види палива як

рівнозначні. Не варто забувати, що рано чи пізно такі об'єкти будуть змушені перейти до використання аварійного чи резервного палива, навіть у випадку, якщо не буде жодних проблем з основним паливом. Тому, що у палива закінчується термін придатності та його необхідно обновлювати, а об'єми сховищ резервного та аварійного палива розраховані на 10 та 3 дні роботи на номінальному режимі відповідно. Що являється доволі великим об'ємом, щоб просто нехтувати ним. Тому важливо розглянути любий метод, що дозволить ефективно спалювати різні види палива.

Аналіз останніх досліджень та публікації. На сьогоднішній день, існує багато досліджень та робіт присвячених комбінованим пальниковим приладам. На ринку представлено немало таких моделей, при чому деякі з них існують уже дуже давно. В основному це пальники призначені для спалювання двох видів палива. Нажаль досі нема рішення, яке б дозволило однаково ефективно спалювати різні види палива, без внесення конструкційних змін в пальниковий прилад. Для прикладу добре відомі пальники моделі ГМП, що являються яскравим прикладом найбільш розповсюдженої технології спалювання з закруткою потоку окиснювача [1, с. 83].

Вони, заради можливості спалювати два види палива були доволі сильно збільшені в розмірі, та отримали два окремі паливні тракти (див. рис. 1а, б). Це значно погіршує структуру течії паливної суміші в зоні стабілізації полум'я, сумішоутворення та стабілізацію полум'я.



Рис. 1а. ГМП пальник

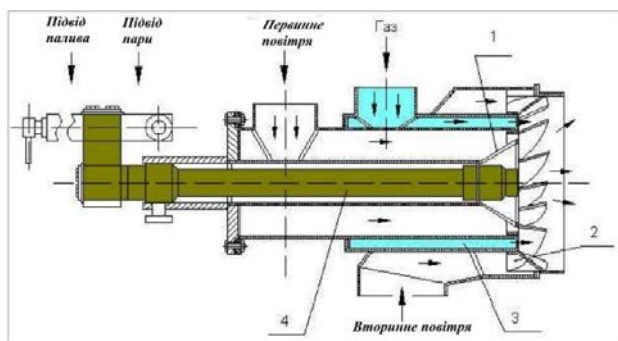


Рис. 1б. Схема ГМП пальника

Набагато рідше зустрічаються роботи по універсальній технології спалювання. Серед вітчизняних варто виділити струменево-нишеву технологію розроблену в Національному технічному університеті України «КПІ ім. І. Сікорського», що активно розвивається в напрямку того, щоб стати по справжньому універсальною технологією спалювання, як мінімум газоподібних палив [2, с. 89-94].

Окрім комбінованих та універсальних технологій спалювання, останнім часом з'являється все більше наукових робіт присвячених використанню домішок водню, для усереднення характеристик різних видів палив, що спрощує їх спалювання на одному пальниковому приладі. Як відомо природний газ має низьку реакційну здатність, що обумовлено його фізико-хімічними властивостями: теплота згорання (Q_H^P), температура горіння ($T_{Гmax}$), нормальна швидкість поширення полум'я ($U_{Нmax}$). А також різну теплотворну здатність з пропан-бутановими сумішами (див. табл. 1). В той час, як водень має високу реакційну здатність при меншій об'ємній теплотворній здатності в кілька разів.

Так, наприклад додавання водню до пропан-бутану, зменшує його теплоту згорання (Q_H^P), та приближає її до рівня природного газу. Це може значно спростити їх використання на одному об'єкті. Також можливо змішати водень з доменним чи коксовим газом, які мають в 12 та в 2 рази нижчу теплоту згорання чим у природного газу, зблизивши їх по значенню коефіцієнта Воббе (W). При цьому також значно покращується реакційна здатність цих газів, що дає додаткову стабільність горіння. Це важливо при роботі на різних видах палива з різними фізико-хімічними властивостями.

Перші експериментальні роботи по домішкам водню до низькорекційних палив показали можливість впливу на структуру факела в струменево-нишевій системі за рахунок зниження температури займання та розширення концентраційних меж горіння суміші.

Колектив науково-технічних співробітників які працюють над покращенням струменево-нишевої технології також проводить роботи по застосуванню домішок водню, для створення універсальних пальникових приладів.

Методи об'єкт та предмет досліджень. Метод дослідження – аналітичні дослідження існуючих найбільш розповсюджених технологій спалювання з точки зору можливості розробки багатопаливного пальникового приладу, без необхідності внесення значних конструкційних змін в його будову.

Об'єкт дослідження – технології та підходи, що дозволяють спалювати однаково ефективно різні види палива.

Предмет дослідження – струменево-нишеві модулі різної конфігурації, для спалювання пропан-бутану, природного газу, та інших газів, а також для використання водневих паливних сумішей з різною часткою водню.

Виклад основного матеріалу досліджень. За часи впровадження струменево-нишевої технології, проведено багато експериментальних досліджень по спалюванні різних видів палив. Дана технологія створювалася для спалювання природного газу. Доволі швидко розпочалися роботи по переведенню струменево-нишевого пальника на роботу на мазуті, пропан-бутані, генераторному, доменному та коксовому газах.

З фізико-хімічних властивостей природного газу впливали геометричні розміри самих пальникових модулів: кількість ($n_{отв}$), діаметром ($\varnothing_{отв}$) та кроком отворів ($s_{отв}$), що роздають газ, так і геометричними розмірами пальникового приладу, площею перерізу (F) повітроводу, відстанню між модулями, коефіцієнтом захаращення (K_F) і т.д. (див. рис. 2). Також ці властивості визначали і основні характеристики газорозподільчої системи.

Достовірність розрахунків підтверджувалась експериментальними дослідженнями на стійкість горіння по швидкості та коефіцієнту надлишку повітря. (див. рис. 3а, б).



Рис. 2. Пальникові модулі перших моделей

При цьому варто відмітити, що струменево-нишева технологія відрізняється вкрай низьким критичним значенням коефіцієнту надлишку повітря (α) = 1,01–1,02 (в більшості інших α = 1,2), тобто то значення при якому починаються значні викиди COx, що зв'язані з недопалом. З рисунку 3.а видно, що технологія також забезпечує можливість роботи ПП на високих швидкостях суміші (Wc) = 80 м.

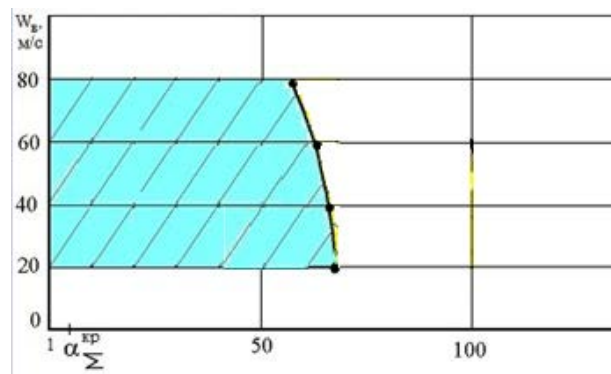


Рис. 3а. Границя стійкості горіння струменево-нишевої системи

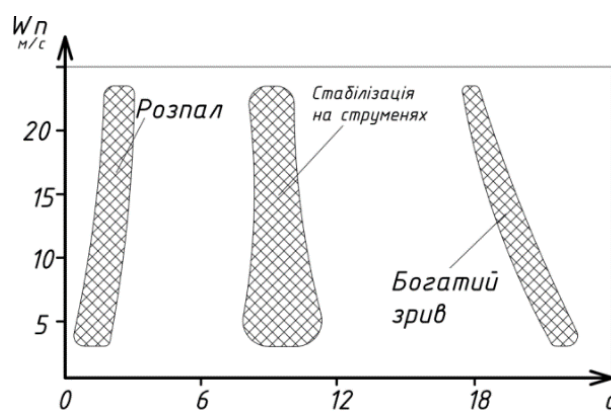


Рис. 3б. Границі спалювання в струменево-нишевій системі

Подальші дослідження спрямовані на адаптацію геометричних параметрів газорозподільчої системи струменево-нишевого модуля до роботи на пропан-бутані. Необхідно відзначити, що характеристики природного газу, та пропан-бутану доволі сильно відрізняються (див. табл. 1).

Попри таку відмінність ведуться роботи над створенням пальникового приладу, що міг би одночасно ефективно спалювати природний газ та пропан-бутан. Для цього розраховуються геометричні розміри газороздавальної системи пальникового модулю, які б підходили, як і для ефективного спалювання пропан-бутану та природного газу (див. рис. 4) [3].

Цікавим прикладом, являється пальниковий прилад, що може спалювати мазут та природний газ. Даний пальниковий прилад складається з двох частин – звичайних модулів пристосованих до роботи на природному газі, а позаду них розміщені модулі, що спалюють мазут.

Теплофізичні характеристики промислових горючих газів

Властивість газу	Одиниця	Газ			
		Метан	Пропан	Бутан	Водень
Густина	кг/м ³	0,717	2,004	2,703	0,090
Межа поширення полум'я:	– нижча C _H	5,0	2,2	1,9	4,1
	– вища C _B	15,0	9,5	8,5	75
Температура запалення t _{зап}	°C	645-850	530-568	490-569	530-596
Нормальна швидкість розповсюдження полум'я U _{Hmax}	см/с	29-33,8	39	37,9	315
Стехіометричний коефіцієнт:	– L _V	9,52	23,9	31,0	2,38
	– L _O	17,23	15,7	15,46	34,5
Нижча теплота згорання Q _H ^P	мДж/м ³	35,8	96,0	118,7	10,76
Температура горіння T _{Гmax}	°C	2040	2155	2118	2240
Енергія запалювання, Q _{зап}	мДж	0,48	0,39	0,38	0,019

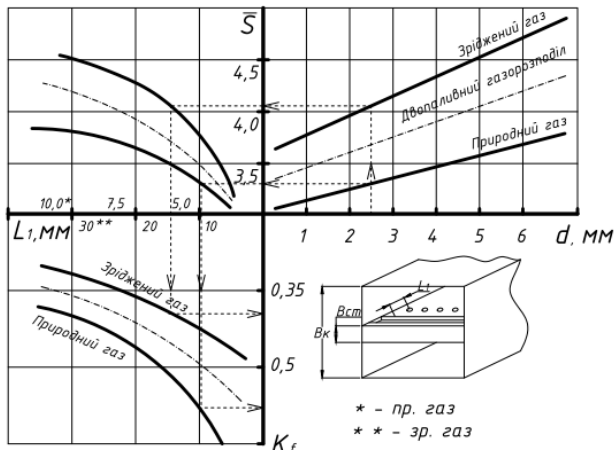


Рис. 4. Номограма для розрахунку паливкового пристрою СНТ



Рис. 5. Комбінований газо-мазутний струменево-нишевий паливковий прилад

В залежності від вибраного палива, один з цих блоків демонтується (процес демонтажу займає кілька хвилин, та не потребує складних операцій). При цьому не змінюється структура течії, якість сумішоутворення і т.д.

Окрім палив, що були згадані нижче, ведуться роботи по спалюванню низькокалорійних газів – доменного, коксового та генераторного. Такі гази звісно надзвичайно важко спалювати без підсвітки та без домішок висококалорійних газів, тим більше адаптувати до одночасного спалювання з іншими видами палива.

Струменево-нишева технологія за рахунок організованої структури течії та якісного сумішоутворення дозволяє високоефективно спалювати низькокалорійні гази: доменний Q_H^P = 650 ккал/м³ та генераторний Q_H^P = 1200 ккал/м³. (див. рис. 6, 7) Як видно газове паливо яке в наш час може цікавити експлуатантів вогнетехнічних об'єктів має доволі різні фізико-хімічні властивості (Q_H^P, U_H, ρ та інші) [4, с. 137–142].



Рис. 6. Спалювання доменного газу



Рис. 7. Спалювання доменного газу

Саме тому останнім часом було розпочато роботу над спалюванням водневих сумішей за допомогою струменево-нишевих пальникових модулів. Як показують дослідження, за допомогою домішок водню, можна привести до схожих фізико-хімічних параметрів такі палива, як наприклад пропан-бутан та природний газ. Експерименти з струменево-нишевими модулями, вже показують можливість спалювання водневих паливних сумішей, з широкими концентраційними межами водню (див. рис. 8) [5].



Рис. 8. Горіння палива з домішками водню в струменево-нишевому модулі

З дослідів, та послідууючого аналізу, видно, що задача по спалюванні різних видів палива на одному і тому ж пальниковому приладі є доволі складною. На даний час виходить лише мінімізувати втрату ефективності спалювання, при чому, чим під більшу кількість різних видів палива треба адаптувати технологію тим явно зменшується ефективність робочого процесу пальникового приладу. Намагатися адаптувати пальниковий прилад до одночасного спалювання видів палива, які за своїми характеристиками сильно відрізняються, являється майже недоцільним в зв'язку з необхідністю вкладати велику кількість коштів в зміну конструкції не лише пальникового приладу, але і в паливну інфраструктуру. Спалювати палива, що схожі за своїми характеристиками, можна як і застосовуючи комбіновані пальникові прилади, що конструкційно та режимно налаштовані на граничні режими, так і за допомогою домішок водню. Потенційно вигідним рішенням було б суміщення цих двох методів, тобто в першу чергу, приведення палив до схожих характеристик домішуванням водню з послідуочим розрахунком конструкційних та режимних параметрів комбінованого пальникового приладу.

Висновки. Розглянуті підходи мають великий потенціал розвитку, тому важливо і далі проводити роботи над їх вдосконаленням. Також варто розглянути комплексний підхід, та об'єднати ці два підходи в один, що являється потенційно непростю, але дуже важливою задачею. Важливу роль грає й технологія спалювання до якої застосовують дані підходи. В ході аналізу, струменево-нишева технологія показала, що на її основі можна створювати універсальну технологію спалювання, та відповідні пальникові прилади.

Список літератури:

1. Абдулін М. З. Розроблення теплофізичних засад технологій спалювання палив із застосуванням струменево-нишових систем : дис. д.т.н. : Київ 2019. 83 с.
2. Абдулін М.З., Сірий О.А. Дослідження енергетичних показників струменево-нішової системи спалювання палива. Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Енергетичні та теплотехнічні процеси й устаткування. (Ulrich's Periodicals Directory, ВІНТІ). Харків. 2018. № 12/1288. С. 89-94.
3. Сірий О. А. Вплив параметрів струменево-нишової системи на робочий процес пальникових пристроїв : дис. ... канд. техн. наук. : 05.14.14 – теплові та ядерні енергоустановки / Олександр Анатолійович Сірий. - Київ, 2016. - 198 с.
4. Абдулін М.З., Куник А.А., Кобилянська О.О. Нові види резервного та аварійного палива. // Збірник праць: «Проблеми екології і експлуатації об'єктів енергетики» – ІПЦ Алкон НАН України – Київ, 2020. 192 с.
5. Абдулін М.З., Куник А.А., Сірий О.А. Підвищення реакційної здатності природного газу та пропан-бутану // Збірник праць: «Проблеми екології та експлуатації об'єктів енергетики» – Київ, 2023 р.

Abdulin M.Z., Kunyk A.A. WAYS OF CREATING UNIVERSAL AND COMBINED BURNING DEVICES

The article presents the results of a comparative analysis of various approaches to the organization of efficient burning of various types of fuel using one burner device.

At many fire-engineering power facilities, several types of fuel are used, for example, natural gas as the main fuel, propane-butane as a reserve, and fuel oil as an emergency fuel. However, today there is a problem of equally effective organization of the combustion process with one burner device for different types of fuel. To solve this problem, specialists have been working for a long time on developing a universal combustion technology and, as the next logical step, on introducing a universal burner device.

The analyzed studies show that a positive effect can also be achieved by burning hydrogen fuel mixtures, by bringing different types of fuels to a similar heat of combustion, Wobbe number, and other physicochemical characteristics.

The article examines existing developments in the development of combustion, the creation of technologies for universal burner devices, and the experience of burning hydrogen fuel mixtures. A comparative analysis was carried out, during which previous experiments were analyzed, and as a result, two approaches to the organization of the effective operation of a fire engineering object on several types of fuel were distinguished. After that, it was concluded that both approaches are potentially useful and relevant and that further work should be conducted in both directions.

Key words: *hydrogen energy, combined burners, jet-niche technology, universal combustion technology, emergency and reserve fuel.*

Боянівський В.П.

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

Трокоз Я.Є.

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

ДОСЛІДЖЕННЯ ЗАКОНОМІРНОСТЕЙ ТЕПЛООБМІНУ ПРИ ЛАМІНАРНІЙ ПЛІВКОВІЙ КОНДЕНСАЦІЇ ВОДЯНОЇ ПАРИ ВСЕРЕДИНІ ГОРИЗОНТАЛЬНО-ТРУБНИХ ТЕПЛООБМІННИКАХ

Теплообмінні апарати в яких має місце плівкова конденсація в горизонтальних трубах знаходять використання в енергетиці, хімічній, харчовій промисловості, а також в техніці опріснення морської води. Інтенсифікація процесу теплообміну при конденсації може призвести до суттєвого зменшення металоемності і габаритних характеристик теплообмінних апаратів. Особливого значення набувають питання інтенсифікації теплообміну у випарних опріснювальних установках, оскільки в цих апаратах коефіцієнти тепловіддачі зі сторони конденсації та випаровування можуть мати близькі значення. Крім цього, в судових опріснювальних установках зниження ваги і габаритів опріснювача дозволить збільшити корисну вантажопідйомність судна і його автономність.

В даній роботі виконані експериментальні дослідження теплообміну при плівковій конденсації водяної пари всередині гладкої горизонтальної труби $d_{\text{вн}} = 16$ мм. Досліджувався вплив густини теплового потоку і швидкості течії пари на інтенсивність теплообміну. Область зміни густини теплового потоку на дослідній ділянці (за методом товстої стінки) складає $\bar{q}_0 = 40 - 260$ кВт/м² при відношенні $\frac{d_{\text{зовні}}}{d_{\text{вн}}} = 5,2$, на задаючій $\bar{q}_L = 0 - 250$ кВт/м² при довжині ділянки $L = 1,3$ м.

Представлено зміна α_0 при $Re_f = 30 - 86$ за умови збільшення швидкості пари w_v . Вплив w_v на інтенсивність теплообміну представлена у вигляді залежності локальних коефіцієнтів тепловіддачі від швидкості течії пари при різних питомих густинах теплового потоку $\alpha_0 = f(w_v; \bar{q}_0)$ і температури насичення $\alpha_0 = f(w_v; t_s)$ в діапазоні зміни швидкості течії пари $w_v = 16 - 64$ м/с.

Встановлена певна нерівномірність характеру розподілу локальних коефіцієнтів тепловіддачі у всьому представленому діапазоні змін густини теплового потоку та швидкості, унаслідок впливу сили тяжіння по периметру гладкої горизонтальної труби. Збільшення швидкості течії пари призводить до інтенсифікації процесу теплообміну. Збільшення питомої густини теплового потоку викликає збільшення поперечного потоку маси і призводить до збільшення дотичного напруження на границі розділу фаз.

Показано, що середні по периметру труби коефіцієнти тепловіддачі зменшуються по довжині і залежать від числового значення і розподілу питомої густини теплового потоку.

Ключові слова: водяна пара, плівкова конденсація, теплообмін, коефіцієнт тепловіддачі, густина теплового потоку, швидкість течії, горизонтальна труба.

Постановка проблеми. Теплообмін при конденсації пари всередині горизонтальних труб досліджений в меншій мірі чим на зовнішній поверхні горизонтальних та вертикальних труб. Із аналізу робіт по конденсації водяної пари всередині гладких горизонтальних труб випливає наступне:

1) на даний момент відсутнє єдине представлення про вплив густини теплового потоку на коефіцієнт тепловіддачі;

2) відсутні надійні рекомендації стосовно теплового розрахунку при конденсації водяної пари за умов низького тиску $P < 0,1$ МПа.

Аналіз останніх досліджень і публікацій.

Постійний інтерес до дослідження особливостей теплообміну при конденсації всередині горизонтальних труб зумовлений необхідністю покращення конструктивних характеристик теплообмінних апаратів, покращенню енергетичної ефективності. Дуже важливим в даному питанні є розуміння впливу основних характеристик процесу на інтенсивність теплообміну.

Питанням дослідження процесу конденсації науковцями відомі ще із ХХ століття. На даний момент є достатньо опублікованих наукових

статей, де автори наводять результати власних експериментальних досліджень та виконали порівняння із роботами інших авторів. Для більш детального ознайомлення досліджень конденсації пари всередині труб варто звернутися до [1]–[3].

Враховуючи наявність достатньо великої кількості наукових публікацій по дослідженню плівкової конденсації в гладких горизонтальних трубах залишається потреба в необхідності розуміння особливостей протікання процесу в залежності від основних характеристик.

Автори опублікували статтю [4] про теоретичні та експериментальні дослідження конденсації в горизонтальних трубах. При чому в роботі цитуються оглядові наукові праці, хоча основний акцент приділений дослідженню конденсації фреонів. У другій частині публікації [5] наведений висновок про степінь впливу критеріїв Рейнольдса та Прантля на тепловіддачу у випадку кільцевого та асиметричного режиму течії, а також приведено графіки для датасету по водяній парі при атмосферному тиску.

Використання приведених в літературі моделей по визначенню коефіцієнтів тепловіддачі при конденсації всередині плівкових горизонтальних теплообмінників призводить до неточності.

В останнє десятиліття значна частина науковців намагаються будувати моделі прогнозування теплообміну за допомогою штучних нейронних мереж (ШНМ). Для прикладу автори [6]–[9] дають початкове розуміння того, як потрібно здійснювати дослідження завдяки ШНМ. В 2023 році автори запропонували модель прогнозування коефіцієнта тепловіддачі при конденсації пари у присутності всередині труби повітря [10].

Варто відмітити той факт, що практично відсутні дослідження локального теплообміну, які могли б врахувати незалежний вплив на теплообмін основних режимних параметрів. Встановлення зв'язку між режимними параметрами і їх впливом на локальний теплообмін дозволить сформулювати більш повну картину по фізиці процесу і на цій основі доповнити наявні банки даних для прогнозування теплообміну з допомогою ШНМ.

Метою статті є визначення локальних по периметру труби коефіцієнтів тепловіддачі при конденсації всередині горизонтальної труби та вивчити вплив на інтенсивність процесу густини теплового потоку, швидкості течії пари по довжині і периметру горизонтальної труби.

Виклад основного матеріалу дослідження. В умовах переважаючого впливу сили тяжіння на процес конденсації середні коефіцієнти тепловід-

дачі $\bar{\alpha}$ практично не залежать від швидкості пари w_v та масового паровмісту x .

Із зростанням швидкості течії пари негативний вплив збільшення питомої густини теплового потоку на інтенсивність тепловіддачі зменшується. При переважаючому впливі сил міжфазного тертя для даних умов і діаметру труби $d_{\text{вн}} = 16$ мм при $w_v \geq 25$ м/с має місце позитивний вплив збільшення \bar{q}_ϕ на закономірність зміни $\bar{\alpha}_\phi$.

Характер впливу \bar{q}_ϕ на інтенсивність тепловіддачі представлений на рис. 1 на якому показано зміна $\bar{\alpha}_\phi$ при $Re_f = 30 - 86$ за умови збільшення швидкості пари w_v . При значеннях $Re_f = 30 - 31$ результати дослідів показують, що має місце як позитивний так і негативний вплив \bar{q}_ϕ на закономірності зміни коефіцієнта тепловіддачі $\bar{\alpha}_\phi$.

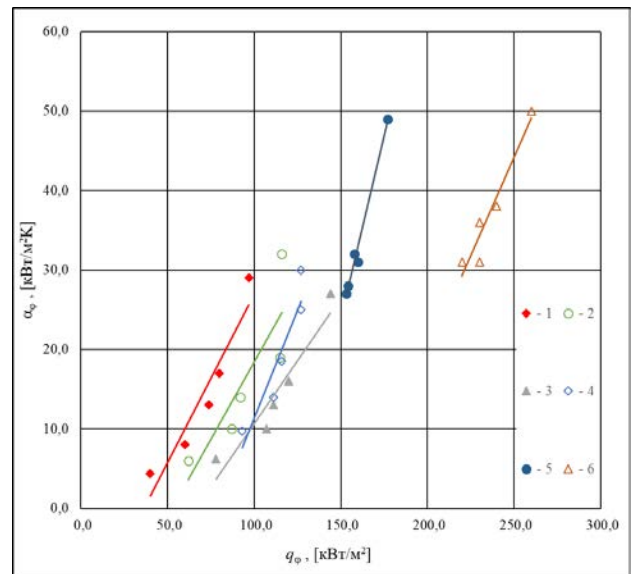


Рис. 1. Вплив теплового потоку q_ϕ на коефіцієнт тепловіддачі α_ϕ при $Re_f=30-86$ (1 – $w_v=16$ м/с; 2 – $w_v=20$ м/с; 3 – $w_v=25$ м/с; 4 – $w_v=48$ м/с; 5 – $w_v=52$ м/с; 6 – $w_v=64$ м/с)

Отримані дані дозволяють встановити, що наявні в літературі суперечливі відомості залежності $\alpha = f(q)$ являються наслідком впливу умов, при яких були виконані експериментальні дослідження і характеризують переважаючий вплив сили тяжіння чи сили міжфазного тертя по довжині дослідної труби. В залежності від співвідношення ділянок на яких переважали вище згадані сили, автори отримували різний характер і степінь впливу q на α .

Варто відмітити, що зростання \bar{q}_ϕ збільшує швидкість течії плівки по периметру труби. При настанні хвильового режиму течії плівки і впливу на теплообмін міжфазного тертя збільшення α_ϕ пов'язано із зниженням термічного опору плівки.

Зростання \bar{q}_φ сприяє не лише збільшенню α_φ (рис. 2), але і вирівнюванні α_φ по φ при всіх значеннях T_n (рис. 3).

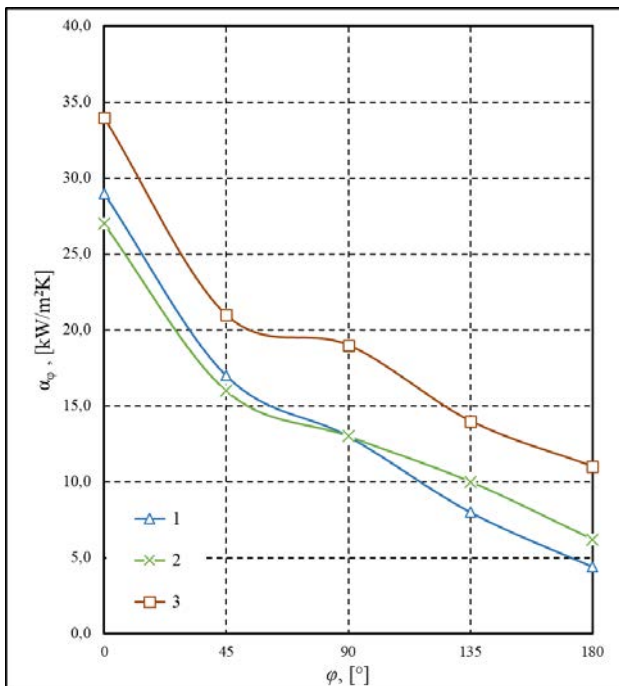


Рис. 2. Вплив теплового потоку q_φ на коефіцієнт тепловіддачі α_φ при $T_n=317$ К (1 – $q_\varphi=70,2$ кВт/м²; 2 – $q_\varphi=112$ кВт/м²; 3 – $q_\varphi=129$ кВт/м²)

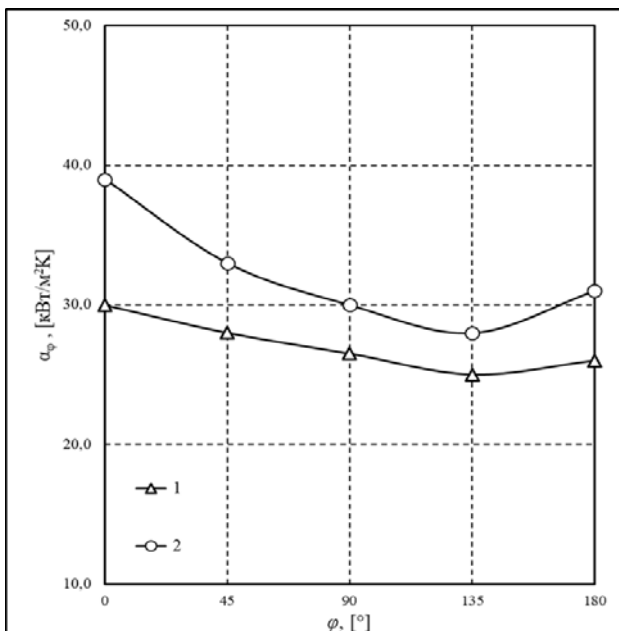


Рис. 3. Вплив теплового потоку q_φ на $\alpha = f(\varphi)$ при $w_v=48$ м/с та $T_n=333$ К (1 – $q_\varphi=121$ кВт/м²; 2 – $q_\varphi=160$ кВт/м²)

По мірі конденсації пари і збільшення кількості конденсату вплив швидкості течії пари проявля-

ється більш складним чином. Складний характер залежності визначається відношенням між термічним опором плівки конденсату, що стікає до низу труби та опором струмка конденсату. На перерозподіл товщин впливає коефіцієнт тертя, що залежить не тільки від w_v , але і від числового значення.

Збільшення швидкості течії пари при призводить до більш інтенсивного росту числових значень в нижній частині периметра труби внаслідок турбулентної течії плівки в зоні струмка конденсату. При цьому характер зміни по φ підтверджує наявність асиметричного ламінарно-хвильового режиму течії плівки конденсату. Згідно [11] наявність хвиль сприяє зриву і зносу крапель рідини при $w_v \geq 20$ м/с. Дослідження по зносу рідини в паровий потік в даній роботі не проводилися і як наслідок оцінити вплив швидкості течії пари w_v на величину зносу рідини є неможливим.

Залежність середніх коефіцієнтів тепловіддачі $\bar{\alpha}_\varphi$ від швидкості течії пари w_v представлено на рис. 4. Як показують результати дослідження, з ростом швидкості коефіцієнт тепловіддачі збільшується у всіх перерізах горизонтальної труби. Характер зміни α_φ від w_v та Re_f при зміні температури насичення t_s , а також вплив t_s на числові значення α_φ представлено на рис. 4 та рис. 5.

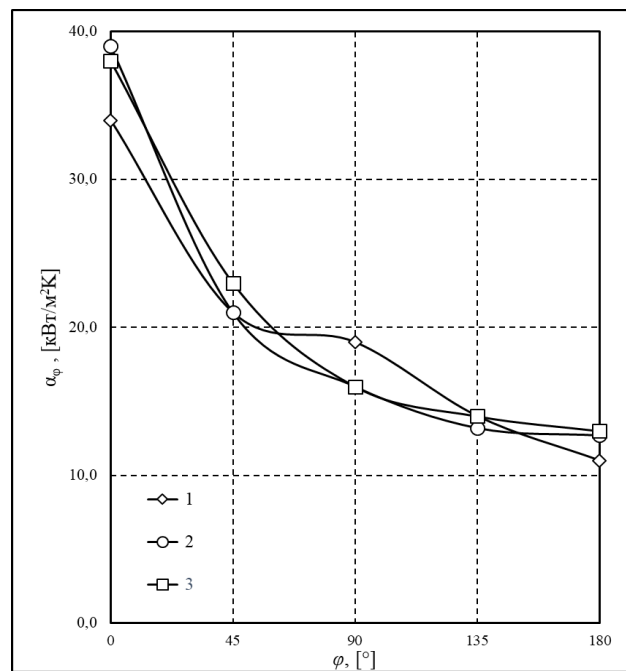


Рис. 4. Вплив температури насичення на локальні α_φ при $w_v=44$ м/с (1 – $T_n=313$ К; 2 – $T_n=334$ К; 3 – $T_n=336$ К)

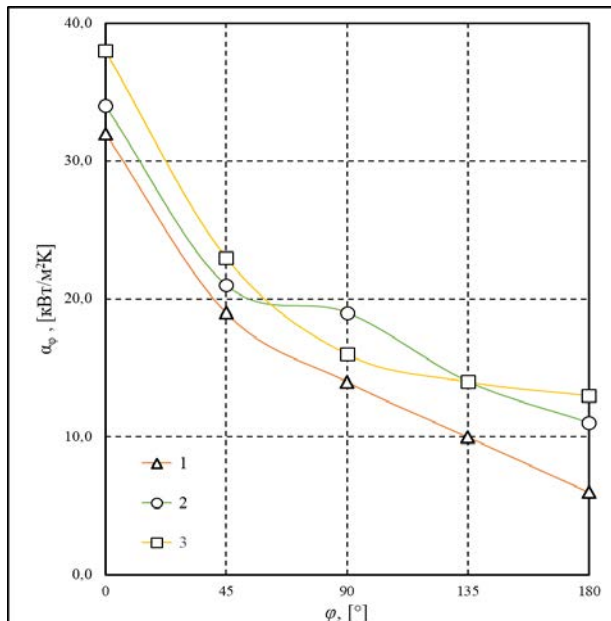


Рис. 5. Вплив w_v та Re_f на інтенсивність тепловіддачі по периметру труби при $T_n=317$ К (1 – $w_v=20$ м/с; $Re_f = 29,8$; 2 – $w_v=44$ м/с; $Re_f = 49$; 3 – $w_v=30$ м/с; $Re_f = 85$)

Висновки. Дослідження конденсації водяної пари проводили при низьких тисках з температурою насичення в межах ($t_s = 44-62^\circ\text{C}$) в середині гладкої труби $d_{\text{вн}} = 16$ мм в діапазоні параметрів величин: швидкість пари на вході в трубу $w_{\text{вх}} = 16-64$ м/с, масовий паровміст $x = 0,02-1,0$, густина теплового потоку $q=3,8-253$ кВт/м².

Проведені експериментальні дослідження теплообміну при конденсації водяної пари всередині горизонтальної труби дозволяють зробити наступні висновки:

- методика експериментальних досліджень дозволила встановити характер зміни інтенсивності теплообміну по довжині і периметру горизонтальної труби в достатньо широкому діапазоні зміни режимних параметрів процесу плівкової конденсації;
- досліджено та показано вплив на закономірності та інтенсивність теплообміну по периметру і довжині горизонтальної труби швидкості течії пари та питомої густини теплового потоку;
- за характером зміни локальних коефіцієнтів тепловіддачі встановлено, що внаслідок впливу сили тяжіння практично у всьому розглянутому діапазоні зміни режимних параметрів присутня нерівномірність інтенсивності теплообміну по периметру горизонтальної труби. Показано, що зростання швидкості пари інтенсифікує процес і призводить до зменшення нерівномірності теплообміну у всьому діапазоні зміни режимних параметрів. Збільшення питомої густини теплового потоку викликає збільшення поперечного потоку маси і призводить до збільшення дотичного напруження на границі розділу фаз;
- показано, що середні по периметру труби коефіцієнти тепловіддачі зменшуються по довжині і залежать від числового значення і розподілу питомої густини теплового потоку.

Список літератури:

1. A. S. Dalkilic and S. Wongwises, 'Intensive literature review of condensation inside smooth and enhanced tubes', *Int. J. Heat Mass Transf.*, vol. 52, no. 15–16, pp. 3409–3426, Jul. 2009, doi: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2009.01.011.
2. J. Huang, J. Zhang, and L. Wang, 'Review of vapor condensation heat and mass transfer in the presence of non-condensable gas', *Appl. Therm. Eng.*, vol. 89, pp. 469–484, Oct. 2015, doi: 10.1016/j.applthermaleng.2015.06.040.
3. O. García-Valladares, 'Review of In-Tube Condensation Heat Transfer Correlations for Smooth and Microfin Tubes', *Heat Transf. Eng.*, vol. 24, no. 4, pp. 6–24, Jul. 2003, doi: 10.1080/01457630304036.
4. V. Rifert and V. Sereda, 'Condensation inside smooth horizontal tubes: Part 1. Survey of the methods of heat-exchange prediction', *Therm. Sci.*, vol. 19, no. 5, pp. 1769–1789, 2015, doi: 10.2298/TSCI140522036R.
5. V. Rifert, V. Sereda, P. Barabash, and V. Gorin, 'Condensation inside smooth horizontal tubes: Part 2. Improvement of heat exchange prediction', *Therm. Sci.*, vol. 21, no. 3, pp. 1479–1489, 2017, doi: 10.2298/TSCI140815045R.
6. Liu, Yan, and Shao-feng Zhang, 'Local flow regime identification for boiling two-phase flow by BP neural networks approach', presented at the 2010 Sixth International Conference on Natural Computation, IEEE, 2010.
7. Z. Li, J. Huang, J. Wang, and M. Ding, 'Comparative study of meta-heuristic algorithms for reactor fuel reloading optimization based on the developed BP-ANN calculation method', *Ann. Nucl. Energy*, vol. 165, p. 108685, Jan. 2022, doi: 10.1016/j.anucene.2021.108685.
8. M. Balcilar, A. S. Dalkilic, and S. Wongwises, 'Artificial neural network techniques for the determination of condensation heat transfer characteristics during downward annular flow of R134a inside a vertical smooth tube', *Int. Commun. Heat Mass Transf.*, vol. 38, no. 1, pp. 75–84, Jan. 2011, doi: 10.1016/j.icheatmasstransfer.2010.10.009.
9. J. Cai, 'Applying support vector machine to predict the critical heat flux in concentric-tube open thermosiphon', *Ann. Nucl. Energy*, vol. 43, pp. 114–122, May 2012, doi: 10.1016/j.anucene.2011.12.029.

10. H. Cao, B. Cao, C. Xia, Z. Meng, H. Bian, and M. Ding, 'Prediction of heat transfer coefficients for steam condensation in the presence of air based on ANN method', *Int. J. Adv. Nucl. React. Des. Technol.*, vol. 5, no. 2, pp. 77–85, Jun. 2023, doi: 10.1016/j.jandt.2023.07.001.
11. G. F. Hewitt and N. S. Hall-Taylor, *Annular two-phase flow*. Oxford: Pergamon Press, 1970.

Boianivskiy V.P., Trokoz Ya.Ye. INVESTIGATION OF HEAT TRANSFER MECHANISMS DURING LAMINAR FILM CONDENSATION OF WATER VAPOR IN HORIZONTAL TUBE HEAT EXCHANGERS

Heat exchangers with film condensation in horizontal pipes are used in the energy, chemical, food industries, as well as in seawater desalination technology. Intensification of the heat exchange process during condensation can lead to a significant reduction in the metal consumption and overall characteristics of heat exchangers. Of particular importance is the intensification of heat transfer in evaporative desalination plants, since in these devices the heat transfer coefficients from the condensation and evaporation sides can have close values. In addition, in shipboard desalination plants, reducing the weight and dimensions of the desalination unit will increase the useful carrying capacity of the vessel and its autonomy.

In this work, experimental studies of heat transfer during film condensation of water vapor inside a smooth horizontal pipe $d_m = 16$ mm were performed. The influence of heat flux density and steam flow rate on the heat transfer intensity was studied. The range of change local heat flux in the experimental section (using the thick wall method) is $\bar{q}_\phi = 40 - 260$ kW/m² at a ratio of $\frac{d_{out}}{d_m} = 5.2$. The range of local heat flux in the determining section is $\bar{q}_L = 0 - 250$ kW/m² at the section length $L = 1.3$ m.

The change at the condition of increasing the steam velocity w_v is presented. The effect of w_v on the heat transfer intensity is presented in the form of the dependence of local heat transfer coefficients on the steam flow velocity at different specific heat flux densities and saturation temperature in the range of changes in the steam flow velocity $w_v = 16 - 64$ m/s.

A change is presented when the steam velocity w_v increases. The effect of w_v on the heat transfer intensity is presented as a dependence of local heat transfer coefficients on the steam velocity at different specific heat flux densities $\alpha_\phi = f(w_v; \bar{q}_\phi)$ and saturation temperature in the range $\alpha_\phi = f(w_v; t_s)$ of changing the steam velocity $w_v = 16 - 64$ m/s.

A determinate unevenness in the distribution of local heat transfer coefficients over the entire range of changes in heat flux density and velocity was found due to the influence of gravity along the perimeter of a smooth horizontal pipe. Increase of the steam flow rate leads to intensification of the heat transfer process. An increase in the heat flux density causes an increase in the transverse mass flow and causes an increase in the shear stress at the boundary.

It is demonstrated that the average heat transfer coefficients along the perimeter of the tube decrease along its length and depend on the numerical value and distribution of the specific local heat flux.

Key words: water steam, film condensation, heat transfer, heat transfer coefficient, local heat flux, flow velocity, horizontal tube.

Дульський А.І.

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

Сторожук М.С.

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

АЛЬТЕРНАТИВНІ ПАЛИВА В ЕНЕРГЕТИЦІ, ПРОБЛЕМИ ТА ПЕРСПЕКТИВИ

Сучасний світ стикається з викликами, пов'язаними зі зростаючим споживанням традиційних енергетичних ресурсів та негативними екологічними наслідками цього процесу. Поступовий перехід до альтернативних та відновлювальних джерел енергії є основним перспективним напрямком розвитку світової енергетики. Зменшення відсотку традиційних енергоресурсів в енергобалансі країни на користь сталих та екологічно безпечних відновлювальних джерел енергії зменшить негативний вплив на навколишнє середовище. Одними з найбільш перспективних напрямів розвитку енергетики нашої країни є енергія сонця, вітру, гідроенергія, біопаливо та воднева енергетика.

Різновиди альтернативних палив можуть відрізнятися за джерелом та процесом їх виробництва. Незважаючи на це, всі вони виготовляються чистим методом, що не супроводжується додатковими викидами вуглекислого газу (CO₂). Синтез альтернативних палив відбувається шляхом застосування двох ключових підходів: пряма утилізація надлишків електроенергії, так зване виробництво «електропалива» (ЕП) та термохімічне перетворення вихідних матеріалів (ТХП).

В роботі виконано огляд літературних джерел із зарубіжної практики стосовно використання альтернативних палив в енергетиці. Розглянуто основні особливості виробництва ЕП таких як: метанол, диметилловий ефір, етанол, метан та приведено їх основні властивості. Підбито висновки щодо перспектив використання даних палив, та зазначено, що ЕП навряд чи займе основну нішу джерела енергії для потреб промислового виробництва. Описано різновиди палив ТХП, серед яких основні: водень, аміак та біодизель (БД). Приведено основні методи виробництва даних видів палив, таких як піроліз, газифікація біомаси, електроліз води, та описано перешкоди, які на даному етапі запобігають широкому їх впровадженню.

Важливим елементом технологічного процесу використання будь-якого палива енергетичним устаткуванням є належна організація технології горіння. В статті виконано огляд вітчизняних технологій горіння розроблених на базі наукових досліджень Київського політехнічного інституту. На сьогоднішній день однією з найбільш поширених вітчизняних технологій спалювання є Струменево-нішева технологія (СНТ), технічні особливості якої дозволяють адаптувати вогнетехнічне обладнання для спалювання традиційних та альтернативних палив.

Ключові слова: альтернативні палива, ЕП, біомаса, водень, аміак, етанол, технологія горіння, пальниковий пристрій.

Постановка проблеми. Енергія відіграє вирішальне значення для функціонування продуктивності людини, а технологічний прогрес став можливим завдяки ефективному використанню енергії. Ефективне енергоспоживання підвищує якість життя, економічний та технологічний розвиток, збільшує обсяги виробництва.

Однак ресурси викопного палива, від яких значною мірою залежить промисловість, мають негативний вплив на екологію, обмежені в доступній кількості і будуть близькі до вичерпання в майбутньому. Безпрецедентна популярність і успішне використання нафтових ресурсів, що спостеріга-

лися у ХХ столітті, будуть знижуватися у ХХІ столітті через нестачу ресурсів і збільшення викидів вуглекислого газу. З точки зору сталого розвитку людства: буде інтенсифікуватися використання альтернативних палив об'єктами промисловості та енергетики [1].

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Сучасні дослідження добре висвітлюють використання відновлюваних та альтернативних видів палива. Однак важливо розуміти, що ці терміни не є взаємозамінними, оскільки не обов'язково стосуються одних і тих самих видів палива. Відновлювані палива використовують відновлювані

ресурси для свого виробництва, включаючи біомаси та інші відновлювані джерела енергії. Альтернативні види палива, з іншого боку, визначаються як будь-яка альтернатива традиційним видам палива, які можна виробляти без обмежень щодо типу сировинного ресурсу, а значить вони можуть бути отримані як з відновлюваних, так і з викопних ресурсів.

Альтернативні види палива можуть відрізнятися за походженням та процесом виробництва. Однак, незалежно від цього, всі вони виробляються за допомогою «стійкої» та «чистої» процедури, без додаткових викидів вуглекислого газу (CO_2). Синтез альтернативних видів палива відбувається за допомогою двох основних методів: пряма утилізація надлишків електроенергії та термохімічне перетворення сировини. Для першого з них останнім часом введено термін «ЕП», щоб чітко підкреслити шлях виробництва та використання електроенергії. ЕП – це вуглецево-нейтральне паливо, синтезоване з надлишку електроенергії відновлювальних енергетичних систем (ВЕС) у газовій або рідкій формі, причому вуглецева нейтральність досягається шляхом замикання циклу таким чином, що використаний CO_2 вловлюється з вихлопних газів або безпосередньо з повітря. Крім того, електроліз, який є ключовою технологією для синтезу ЕП, може експлуатуватися в гнучкому режимі відповідно до виробництва відновлюваних джерел енергії, що підвищує загальну ефективність системи і водночас дозволяє підвищити рівень впровадження ВЕС. Другим шляхом синтезу альтернативних видів палива є термохімічне перетворення сировини в корисні газоподібні або рідкі види палива. Ці процеси

широко досліджуються в наш час, оскільки вони можуть перетворювати різні відходи або сировину в цінні альтернативні види палива або хімічні речовини [2].

Метою роботи є аналіз особливостей використання альтернативного палива та оцінка можливості застосування вітчизняних розробок для перспективного впровадження на енергетичних об'єктах національної економіки.

Виклад основного матеріалу

1. Паливо, отримане з використанням електроенергії (ЕП)

1.1 Загальна характеристика

ЕП – це вид синтетичного палива, що виробляється за допомогою електроенергії (часто відновлюваної енергії) для перетворення вуглекислого газу (CO_2) в рідке або газоподібне паливо. Згідно [3, 4] процес виробництва ЕП зазвичай включає наступні етапи (див. рис. 1):

– Уловлювання вуглецю: CO_2 вловлюється з атмосфери або з промислових джерел, таких як електростанції або цементні заводи та ін.

– Електроліз: Відновлювана електроенергія, така як сонячна або вітрова, використовується для розщеплення молекул води на водень (H_2) і кисень (O_2).

– Синтез: Уловлений CO_2 поєднується з воднем, отриманим на етапі 2, за допомогою хімічної реакції з утворенням синтетичних вуглеводнів, таких як метанол, диметиловий ефір (ДМЕ) або метан.

1.2 Різновиди ЕП

Нижче представлено основні ЕП та їх характерні особливості.

Метанол (CH_3OH) – це простий спирт прозора безбарвна легкозаймиста рідина з характерним

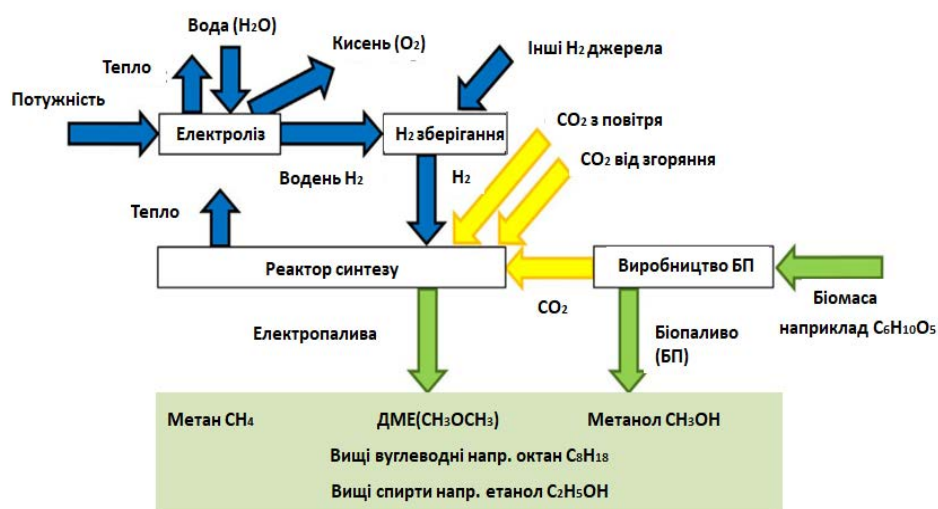


Рис. 1. Етапи процесу виробництва ЕП [3]

Енергетичні характеристики основних електропалив [5]

Властивості	Диметилловий ефір	Метанол	Етанол	Метан
Теплотворна здатність, МДж/кг	28,8	19,5	25,0	50,0
Густина, г/см ³	0,66	0,79	0,81	0,000657
Температура спалаху, °С	-41	13	13	187
Температура самозаймання	421	464	365	537,8
Відношення повітря/паливо	9,0	6,5	9,0	17,2
Температура кипіння, °С	-25	65	78	-162

запахом. Метанол є токсичною речовиною, яка може бути небезпечною для людського здоров'я. При вдиханні парів метанолу можуть виникнути головний біль, запаморочення, нудота, блювота та інші проблеми зі здоров'ям. При випадковому ковтанні метанолу може виникнути серйозне отруєння, що може призвести до смерті [3]. Токсичність, високий корозійний потенціал, і низька енергетична щільність – є основними недоліками метанолу [2].

Диметилловий ефір (C₂H₆O) – є безбарвною газоподібною речовиною, горить видимим блакитним полум'ям і має солодкуватий запах, що є важливим питанням безпеки [3]. Транспортується у вигляді зрідженого газу під тиском парів. Контакт з рідиною може спричинити обмороження. Він легко займається. Його пари важчі за повітря. Будь-який витік може бути як рідиною, так і парою. Може викликати задуху через витіснення повітря. Має низьку інгаляційну токсичність. При тривалому впливі вогню або сильному нагріванні контейнери можуть зруйнуватися і вибухнути.

Етанол (C₂H₅OH) – це легкозаймиста хімічна речовина з групи спиртів. Він має безбарвну та легко текучу рідинну форму, що має характерний запах та гостринку на смак. Його пара в 1,6 рази важче повітря. Є токсичним, у великих дозах може нанести величезну шкоду організму як в рідкому так і газоподібному стані. Але оскільки етанол за звичайних умов – це рідина, то ймовірність отруєння ним не свідомо є дуже малою.

Метан (CH₄) – це найпростіша органічна сполука вуглецю з воднем безбарвний, без запаху та без смаку газ, який складається з одного атома вуглецю та чотирьох атомів водню. Можна стверджувати, що метан не є шкідливим для здоров'я людей та не має токсичної дії. Крім того, в порівнянні з нафтопродуктами, метан є менш пожежо-небезпечним, що пояснюється тим, що він має вищу температуру спалаху. Основні теплофізичні властивості наведених органічних сполук представлені в табл. 1.

Проаналізувавши [2, 3, 4, 7, 6] можна зробити наступні висновки щодо перспектив та недоліків впровадження ЕП.

Згідно [2, 3, 4, 7] до перспектив можна віднести:

- скорочення викидів вуглецю: електричне паливо має потенціал для значного скорочення викидів вуглецю, особливо в галузях, де декарбонізація є складним завданням, таких як авіація та судноплавство. Використовуючи відновлювані джерела енергії для виробництва електричного палива, викиди можна значно скоротити порівняно з викопними видами палива;

- гнучкість та універсальність: ЕП можна використовувати в різних сферах, від транспорту до виробництва електроенергії та опалення. Це робить їх гнучким і універсальним джерелом енергії, яке можна адаптувати для задоволення різних енергетичних потреб і моделей попиту;

- зберігання енергії: ЕП можна зберігати протягом тривалого часу, що робить його привабливим варіантом для зберігання відновлюваної енергії та вирішення проблеми перебоїв у постачанні. Це може допомогти підвищити надійність і стабільність енергосистеми;

- потенціал для циркулярної економіки: електричне паливо можна виробляти з уловленого вуглекислого газу, який може надходити з промислових процесів або безпосередньо з атмосфери. Це створює потенціал для циркулярної економіки, де викиди вуглецю уловлюються і повторно використовуються для виробництва нових видів палива;

- менше забруднення повітря: електричне паливо виробляє менше забруднюючих речовин, ніж традиційне викопне паливо, що може покращити якість повітря та зменшити негативний вплив на здоров'я, пов'язаний із забрудненням повітря.

Основні недоліки [2, 6]:

- вища вартість: ЕП дорожче за інші види палива, а його виробництво є енергоємним. Це означає, що вони не є економічно ефективним варіантом для більшості випадків як мінімум у глобальному транспортному секторі;

- викиди вуглецю: ЕП виділяє вуглець при використанні, що стає дорогим, коли бюджет на викиди вуглецю обмежений. Тому, якщо є можливість зберігати вуглець, економічно вигідніше вилучити вуглець із системи і зберігати його, ніж повторно використовувати для виробництва ЕП;

- обмежений потенціал: ЕП не може задовольнити загальний попит на синтетичне паливо. У більшості випадків економічно ефективний потенціал біопалива є вищим, ніж у ЕП;

- невизначеність в інфраструктурі розподілу водню: витрати на інфраструктуру розподілу водню та зберігання водню насамперед в транспортних засобах є невизначеними і можуть бути недооцінені або переоцінені в моделі. Навіть у тих випадках, коли водень є економічно ефективним, потенціал ЕП все ще дуже низький.

Таким чином, даний вид синтетичного палива може розглядатися як одиничний варіант заміщення традиційного палива і навряд чи у перспективі буде основним джерелом енергії для потреб виробництва.

2. Палива термохімічного перетворення (ТХП)

2.1 Різновиди ТХП

Водень

Водень є найчистішим з відомих джерел енергії, який можна виробляти з різних енергоносіїв, таких як викопне паливо, ядерна енергія або ВДЕ [8]. Наразі водень широко використовується як ракетне паливо в аерокосмічній галузі, як матеріал для переробки в нафтохімічній промисловості, а також у багатьох інших промислових процесах. Майже 50% водню у світі використовується лише для виробництва аміаку (NH_3). При використанні водню як палива в результаті його окислення виділяється лише вода і тепло, без додаткових викидів (1). Незважаючи на те, що водень є найпоширенішим хімічним елементом у Всесвіті, його природна, елементарна присутність на Землі зустрічається рідко. Тим не менш, водень можна знайти в різних вуглеводнях, воді або синтезованих хімічних речовинах.



Однією з найбільших переваг є висока енергетична щільність, за н.у. $120,7 \text{ МДж/м}^3$. Висока густина енергії в поєднанні зі зрілістю виробничих процесів сприяє використанню водню як потенційного сезонного накопичувача енергії в майбутньому, а також як альтернативного палива [2]. Паливні елементи виглядають найбільш перспективним рішенням для утилізації водню як для портативного, так і для стаціонарного використання.

Через низький об'ємний вміст енергії, ефективно застосування вимагає зрідження при -253°C або стиснення до 700 бар. Як показує [9] ці обидва процеси є дуже енергоємними, що призводить до втрат енергії близько 10% для при стисненні і близько 40% при зрідженні. Крім того, висока горючість вимагає обережного поводження з ним і піднімає низку питань безпеки. Матеріали, що використовуються для водневих сховищ, не повинні вступати в реакцію з воднем у будь-якій формі і водночас слугувати надійним теплоізолятором.

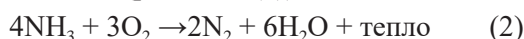
Виробництво водню

Виробництво водню з викопного палива є відомою процедурою, де в якості сировини використовується природний газ або вугілля. Сьогодні водень найчастіше отримують шляхом парового риформінгу метану, хоча його також можна виробляти шляхом часткового або автотермічного окислення чи газифікації [8]. Тим не менш, виробництво з викопного палива неможливе в майбутній декарбонізованій енергетичній системі, і технологія повинна зміститися в бік сталих рішень. Виробництво з відновлюваних джерел енергії передбачає піроліз або газифікацію біомаси або електроліз води з надлишку електроенергії ВЕС.

Аміак

Аміак (NH_3) – це повністю безвуглецева хімічна сполука, яка широко використовується як добриво, а останнім часом привертає значну увагу як потенційний енергоносіє або альтернативне паливо [10]. На сьогоднішній день аміак є широко використовуваною хімічною речовиною, виробництво якої становить приблизно 200 мільйонів тонн на рік. Наразі основною сировиною для синтезу за технологією Габера-Боша є викопні види палива, такі як природний газ, вугілля та нафта, а також азот з повітря [11]. Аміак має кімнатну температуру і тиск у рідкій фазі 10 бар, а його зберігання є досить простим завдяки вже розвиненій інфраструктурі розподілу. Енергетична щільність аміаку становить близько $22,5 \text{ МДж/кг}$, з однією з найвищих гравітаційних густин водню (17,8 мас. %), що робить його ідеальним енергоносієм для водневого палива [2]. Стале використання аміаку передбачає, що надлишок електроенергії з ВДЕ використовується для електролізу та виробництва водню, який потім синтезується з азоту з повітря. За необхідності аміак знову перетворюється на водень, а потім використовується для виробництва електроенергії [10]. Незважаючи на те, що цей процес є дуже енергоємним і призводить до значних енергетичних втрат, процедура є досить простою, а інфраструктура вже створена [2]. Крім

того, аміак може ефективно використовуватися для зберігання енергії, оскільки його ціна є більш конкурентоспроможною, ніж зберігання чистого водню. Згідно з дослідженням, зберігання водню у вигляді аміаку протягом 182 днів коштує 0,54 \$/кг, порівняно з 14,95 \$/кг для чистого водню. У Катарі вже існують сховища, які використовують аміак для зберігання водню. Якщо аміак використовується виключно як паливо, його енергоємність дорівнює енергоємності водню. Повне окислення аміаку є чистим, оскільки продуктами є азот, вода і виділення тепла (рівняння (2)).



Основною проблемою використання аміаку є його висока токсичність та небезпечність. Аміак – це безбарвний газ з різким запахом, легший за повітря, і він може спричинити серйозні проблеми зі здоров'ям. У рідкій фазі аміак є сильно корозійним, особливо в суміші з водою. Крім того, неповне згоряння аміаку призводить до утворення викидів забруднюючих речовин NO_x . Проблеми, пов'язані з безпосереднім застосуванням аміаку в двигунах внутрішнього згоряння або газових турбінах, пов'язані з високою температурою займання ($\sim 650^\circ\text{C}$), і порівняно меншу густину енергії, ніж у бензину, що вимагає модифікації двигуна [10]. Крім того, аміак має низьку швидкість горіння і часто потребує добавок, таких як H_2 , CH_4 або дизельне паливо, щоб його запалити. Безпосереднє застосування в паливних елементах можливе лише для твердооксидних паливних елементів (SOFC) через високі робочі температури, де аміак може бути розщеплений і утилізований за допомогою водню. Використання аміаку як палива викликає певні занепокоєння; тим не менш, Міжнародне агентство з охорони навколишнього середовища класифікувало аміак як потенційний носій енергії, і в усьому світі докладаються значні зусилля для створення екологічно чистого виробництва.

Синтез аміаку

Основними компонентами для синтезу аміаку є водень (H_2) та азот (N_2) за допомогою процесу Габера-Боша. Водень найчастіше отримують шляхом риформінгу природного газу, на який припадає від 1 до 2% річної потреби в енергії [12]. Процес Хабера-Боша є енергоємним і кінетично складним. Важливо підкреслити, що виробництво аміаку Haber-Bosch працює як безперервний процес, в якому при кожному проходженні через реактор відбувається перетворення лише близько 15% N_2 і H_2 в NH_3 , але при безперервній рециркуляції загальний коефіцієнт перетворення стано-

вить близько 97% [13]. Така рециркуляція означає, що перерви в роботі ВРЕС (відновлюваних джерел енергії з сонячної та вітрових ресурсів) не є серйозною проблемою, оскільки сировину можна виробляти, коли є надлишок електроенергії, і зберігати її для подальшого використання. Деякі типи «зелених» процесів синтезу аміаку були продемонстровані в Америці, Австралії, Африці, Канаді, Німеччині, на Близькому Сході, в Норвегії та Великобританії. Крім того, на фермі Pinehurst Farm в штаті Айова вже кілька років працює невелика сонячна установка з виробництва аміаку. Вироблений таким чином аміак використовується як добриво та паливо для тракторів [14].

Біодизель (БД)

БД складається з моноалкільних ефірів – довгих ланцюжків олій жирних кислот, отриманих з відновлюваних джерел ліпідів, таких як неїстівні овочі, лігноцелюозна біомаса або тваринні жири. Існує чотири покоління БД, хоча лише два з них досягли комерційних масштабів. БД 1-го покоління – це біопаливо, яке виробляється з харчових культур, таких як кукурудза, цукрова тростина, пшениця та рослинні олії. Друге покоління виробляється з енергетичних і неїстівних овочів, відпрацьованих масел і лігноцелюозної сировини. Важливо підкреслити, що БД може вироблятися стабільно лише в тому випадку, якщо виробництво не конкурує з ланцюжком постачання продуктів харчування. БД 3-го та 4-го поколінь все ще перебуває на стадії становлення і включає в себе біомасу водоростей та генетично модифіковані мікроорганізми відповідно до [15]. На сьогоднішній день БД успішно застосовується в транспортному секторі в паливних сумішах зі звичайною нафтою. Існує два стандарти для виробництва БД: для ЄС (EN14214) та для США (ASTM 6751). Теплотворна здатність БД становить від 38 до 45 МДж/кг, що можна порівняти зі звичайним дизельним паливом.

Проблеми з біодизелем в основному пов'язані з його високою в'язкістю та густиною, що призводить до проблем з впорскуванням палива. З цієї причини БД змішують з дизельним паливом для покращення холодного запуску та впорскування палива. Згідно з [16] нижча енергетична щільність означає дещо більшу витрату палива. З іншого боку, продуктивність БД в звичайних двигунах з індукційним впорскуванням є досить високою. Скорочення викидів забруднюючих речовин може становити до 78%, залежно від якості палива та співвідношення компонентів суміші. Зокрема, при спалюванні БДпалива зменшується утво-

рення оксиду вуглецю (CO), CO₂, твердих частинок та незгорілих вуглеводнів, тоді як викиди NO_x є дещо вищими. Було показано, що продуктивність двигуна може бути збільшена на 3%, коли 20% БД змішується з бензином [17]. В даний час БД виробляється шляхом перетерифікації, коли сировина змішується з метанолом або етанолом. Піроліз може бути новим потенційним методом виробництва високоякісного БДного палива з різної сировини. Цікавою темою досліджень є покращення якості біомасел через процес спільного піролізу з відходами для покращення якості та властивостей палива.

Піроліз паливних сумішей для покращення характеристик біопалива

Піроліз – це метод термохімічного перетворення, при якому термічне розкладання відбувається за відсутності кисню. Похідними продуктами є карбонізований залишок, рідини та газу. Останнім часом піроліз впроваджується як перспективний метод перетворення відходів металургійних підприємств у цінні види палива та хімічні речовини [14]. Залежно від бажаного розподілу продукту, піроліз проводять при різних температурних діапазонах. Якщо бажано отримати рідкий вихід, температура піднімається до 600°C для більшої частини сировини, тоді як газифікацію проводять при температурі вище 700°C.

Піроліз біомаси найчастіше здійснюється при температурі від 200 до 450°C, де сировина перетворюється на високоякісні рідини, піролізні газу та багатий на вуглець зольний залишок [18]. Вихід продукту залежить від умов експлуатації та типу сировини, тоді як отримані продукти, як правило, повинні пройти процеси переробки перед використанням. Наприклад, біомасла, як правило, мають нижчу теплотворну здатність і нестабільні при високій температурі, в той час як газу піролізу можуть містити високу частку CO₂ [2].

Останнім часом значні дослідницькі зусилля спрямовуються на перетворення біомаси в цінні види палива та хімічних речовин. Особливо цікавим є піроліз відходів, таких як тирса, сільськогосподарські відходи, різноманітна солома, енергетичні культури тощо [19]. Незважаючи на те, що піроліз може значно покращити властивості біомаси, подальше покращення теплотворної здатності, зниження в'язкості, високої кислотності та термічної стабільності вимагає додаткових зусиль. Цікавим може бути синергетичний ефект, який виникає під час спільного піролізу біомаси з відходами пластику. Пластик має високий вміст вуглецю та водню, а теплотворна здат-

ність подібна до викопного палива. Крім того, низький вміст або повна відсутність кисню в елементному складі призводить до утворення оксигенованих сполук, що є основним недоліком біопалива. Кілька досліджень показали, що спільний піроліз значно покращує властивості біомасла з точки зору теплоти згоряння, термічної стабільності та в'язкості. Оскільки хімічна та механічна переробка пластмас є дорогою, а для деяких типів навіть неможливою, спільний піроліз здається перспективним методом управління відходами [2]. Крім того, різні типи відходів, що не підлягають вторинній переробці, можуть бути піддані спільному піролізу з біомасою, такою як осад стічних вод, харчові відходи, гума тощо [2]. Незважаючи на те, що проведені дослідження показали, що властивості продуктів значно покращуються в процесі піролізу, необхідно зробити більше для зменшення виходу різних забруднюючих речовин, які обмежують негайну утилізацію.

Отже, у декарбонізованій енергетичній системі необхідність використання альтернативних видів палива є необхідною. Особливо важливою є їх роль у декарбонізації транспорту та промисловості, де використання електроенергії є менш доцільним або неможливим. Важливо зазначити, що на сьогоднішній день виробництво палива найчастіше ґрунтується на викопних ресурсах, використовуючи їх як сировину і паливо. Отже, з даного огляду можна зробити наступні висновки:

Перш за все, доступність викопних видів палива ускладнює для альтернативних видів палива досягнення конкурентоспроможної собівартості виробництва. У випадку з біопаливом та відходами основною проблемою є критерій якості; нижча теплота згоряння, вища кислотність, термічна стабільність і т.п. обмежують більш широке використання наявних на сьогоднішній день комерційно доступних видів біопалива. Тим не менш, дослідження в цій галузі тривають вже деякий час з постійним вдосконаленням вироблених видів палива, а це означає, що роль такого палива не викликає сумнівів у майбутньому. З іншого боку, розглянуті хімічні речовини (H₂, NH₃ та спиртовмісні палива) мають добре відому технологію виробництва, але вони переважно синтезуються для промислових потреб. Але, впровадження нових видів палива вимагає модифікації існуючих технологій утилізації. В той час як біопаливо та спиртове паливо можуть бути ефективно використані в існуючих двигунах з невеликими модифікаціями, у випадку водню та аміаку необхідна розробка нових технологій або значні модифікації. Паливні елементи, розроблені

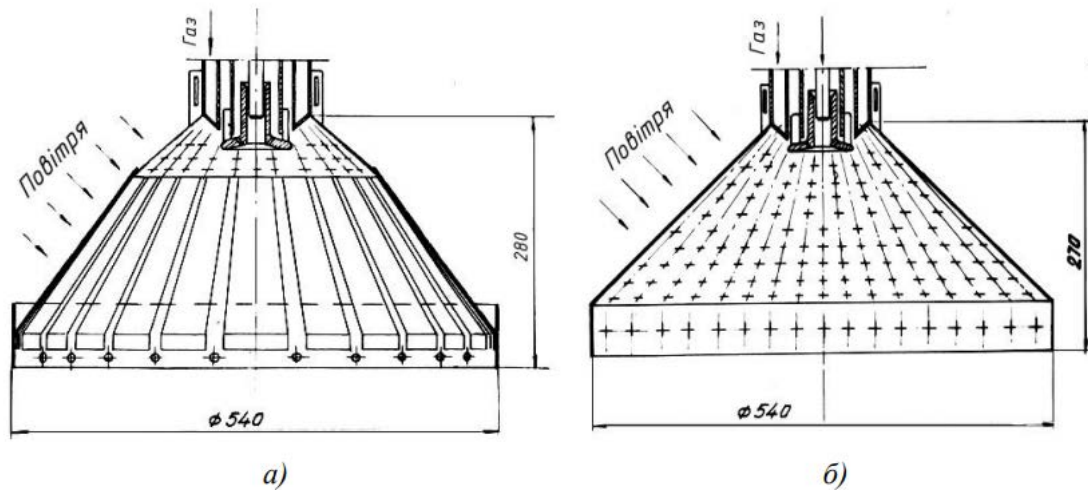


Рис. 2. Схема проточної частини струменево-стабілізаторного (а) та струменевого пальників (б)

для використання водню, демонструють чудові перспективи для застосування як в стаціонарних, так і в портативних пристроях, навіть незважаючи на те, що необхідна додаткова робота для оптимізації робочих параметрів і підвищення ефективності. Останньою перешкодою для ширшого впровадження альтернативних видів палива є виробництво, яке повинно переорієнтуватися на чисті та стійкі рішення. У випадку з біопаливом це, в першу чергу, означає утилізацію відходів сільськогосподарської та промислової біомаси для виробництва високоякісного екологічно чистого палива. Водночас, для досягнення вуглецевої нейтральності, виробництво синтетичних палив повинно переорієнтуватися на нові рішення, які не передбачають переробку викопного палива як сировини.

3. Технології спалювання палива КПІ імені Ігоря Сікорського

На теренах Київського політехнічного інституту тривалий термін розроблялись та вдосконалювались високоефективні пальникові пристрої (ПП) струменево-стабілізаторного типу, які характеризуються високою інтенсифікацією процесу горіння та надійною роботою в широкому діапазоні теплових навантажень

ПП струменево-стабілізаторного типу працюють на основі дифузійного принципу сумішоутворення. Паливо подається у зону рециркуляції, що утворюється за стабілізатором через обтікання потоком повітря. У струменевих ПП струмені повітря взаємодіють зі струменями газу. Повітря надходить через отвори на конічній поверхні, а паливо подається в затінену зону, яка формується з рядів спарованих повітряних отворів (рис. 2).

Струменеві та струменево-стабілізаторні ПП призначені для ефективного спалювання палива за високих коефіцієнтів надлишку повітря. Вони також володіють властивістю саморегулювання складу паливної суміші в зоні розвитку факелів полум'я, що дозволяє працювати при змінних коефіцієнтах надлишку повітря. Ці характеристики знайшли застосування при впровадженні технології для компресорних станцій газотранспортного устаткування.

Наступною перспективною розробкою, виконаною в «КПІ» була реалізація дифузійно-стабілізаторної технології з використанням трубчастих каналів з розширенням потоку (див. рис. 3). Ця схема використовує трубчасті модулі для стабілізації та інтенсифікації горіння, що дозволяє знизити токсичні викиди продуктів згорання завдяки попередньому сумішоутворенню, стадійному спалюванню та прямої аеродинамічній схемі течії. У порівнянні зі струменевими та струменево-стабілізаторними ПП, трубчасті модулі мають значно менший гідравлічний опір.

На основі запропонованої конструкції була розроблена і впроваджена дифузійно-стабілізаторна технологія спалювання палив, яка використовує аеродинамічні ефекти взаємодії системи паливних струменів, впроваджуваних у зону змішування палива та повітря, за тілами з неповною обтічністю, які знаходяться у потоці окисника (див. рис. 2). Палильні пристрої цієї конструкції відносяться до проміжної групи, яка поєднує кінетичні та дифузійні характеристики, що визначає їхні робочі параметри. Використання такої технології забезпечує високу інтенсивність змішування палива з повітрям у зоні циркуляції.

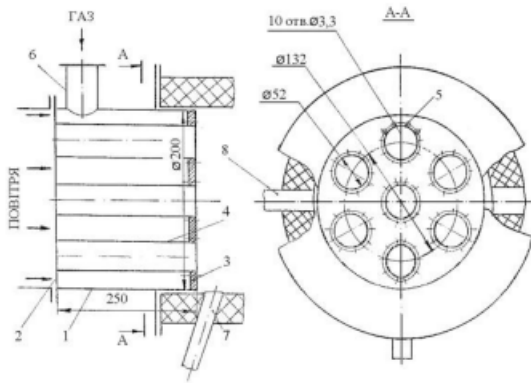


Рис. 3. Загальний вид пальника на основі трубчастих модулів: 1 – корпус; 2 – фронтальна трубка дошка; 3 – задня трубка дошка; 4 – повітряні трубки; 5 – газові отвори; 6 – патрубок подачі палива; 7 – запальник; 8 – канал візуалізації

На сьогоднішній день однією з найбільш поширених вітчизняних технологій спалювання є технологія з нішевою системою (СНТ) (рис. 4). Вона базується на декількох основних принципах:

- раціональний розподіл палива в потоці окисника;
- стійка регульована структура течії палива, окисника та продуктів згоряння;
- саморегульованість складу паливної суміші в зоні стабілізації факелу.

Всі ці принципи досягаються завдяки вдалому конструктивному розташуванню струменевонішевої системи на автономних колекторах-пілонах, які утворюють пальник [20].

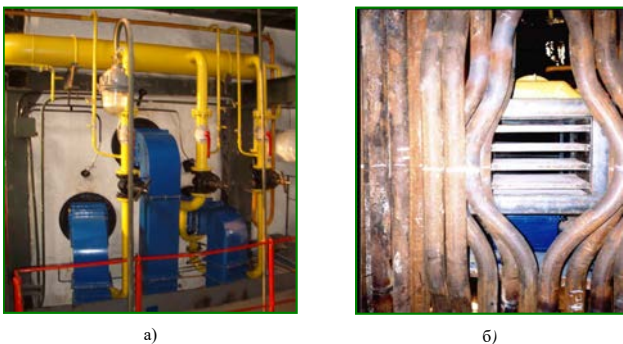


Рис. 4. ПП СНТ на котлі ПТВМ-30

Висновки. Більшість альтернативних палив досі не досягли комерційного масштабу застосування через обмеження в процесах виробництва або споживання та технологіях. Головним чином це пов'язано з високими енерговитратами, яке палива повинні пройти протягом життєвого циклу, або економічною життєздатністю самого процесу виробництва. Біомаса наразі є єдиним альтернативним паливом, що використовується на комерційній основі, і очікується, що її спо-

живання зростатиме. Інші альтернативні види палива, такі як водень, аміак, метанол, БД, біогаз, паливо з відходів тощо, все ще не досягли комерційної зрілості, а їх поточне споживання є майже незначним. Для стимулювання ширшого використання водню як альтернативного палива необхідна відповідна політика. Аміак може відігравати важливу роль як накопичувач, або носій енергії в майбутній енергетичній системі, має налагоджену інфраструктуру для виробництва і транспортування. Спиртовмісні види палива вже використовуються, та мають потенціал для використання в судноплавстві, та автотранспорті. Відходи, що не підлягають вторинній переробці, можна ефективно використовувати як сировину для виробництва палива, вирішуючи проблеми зі спалюванням відходів. Наразі бракує комплексних оглядів, які б узагальнювали та оцінювали альтернативні види палива, їхні переваги, недоліки та перспективи впровадження.

Синтез альтернативних видів палива слід поєднувати з ВДЕ, що дозволить їм більше проникнути в енергетичну систему, одночасно зменшуючи вуглецевий слід від виробленого палива. Поєднання синтезу з ВДЕ може також знизити виробничі витрати, коли буде досягнута більша частка нестабільних відновлюваних джерел. Помітною тенденцією в дослідженнях є пряме використання сонячної енергії для паливного синтезу. Основна перевага сонячного виробництва полягає в тому, що немає потреби в зовнішньому джерелі енергії. Тим не менш, низька ефективність перетворення сонячної енергії значно впливає на загальну ефективність процесу, що робить сонячну енергетику економічно неконкурентоспроможною. Крім того, значні дослідницькі зусилля спрямовуються на розробку технологій, які можуть працювати в гнучкому режимі в комерційних масштабах. Це особливо важливо для технологій електролізу та уловлювання вуглецю, які використовуються для виробництва необхідної сировини (H_2 та CO_2) для синтезу альтернативних видів палива. Поєднання цих технологій з ВДЕ матиме численні переваги, такі як зниження виробничих витрат, зменшення обмежень у виробництві електроенергії та покращення стабільності енергосистеми. Говорячи про методи термохімічного перетворення для виробництва альтернативного палива, значні дослідницькі зусилля докладаються для того, щоб вивести такі процеси на більш масштабний і комерційний рівень. Піроліз та газифікація особливо біопаливні технології цікаві тим, що вони можуть переробляти різні відходи і перетво-

рювати їх на цінне паливо або хімічні речовини. Останнім часом фокус досліджень змістився на покращення властивостей біопалива шляхом спільного піролізу або спільної газифікації з висококалорійними відходами (тобто з пластиками, що відслужили свій термін). Це важливо не тільки для синтезу палива, але й як метод поводження з відходами.

Відомі вітчизняні розробки промислового газопальникового устаткування можуть стати у нагоді при адаптації існуючих технологій горіння традиційних викопних палив до альтернативних варіантів їх використання. Наукові розробки КПП у цьому плані є перспективним напрямом поступового переходу до альтернативного палива енергетичними об'єктами країни.

Список літератури:

1. Handbook of Alternative Fuel Technologies, Second /edited by: Sunggyu Lee, James G. Speight, Sudarshan K. Loyalka/ 2014
2. H. Stancin , H. Mikulcic , X. Wang ,N. Duic / A review on alternative fuels in future energy system/ Renewable and Sustainable Energy Reviews /Volume 128/ August 2020, 109927 <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1364032120302185>
3. Brynolf S, Taljegard M, Grahn M, Hansson J. Electrofuels for the transport sector: a review of production costs. *Renew Sustain Energy Rev* 2018;81:1887–905. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.05.288>.
4. Lester MS, Bramstoft R, Münster M. Analysis on electrofuels in future energy systems: a 2050 case study. *Energy* 2020;199. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2020.117408>.
5. Гунько Ірина Василівна/ ТЕНДЕНЦІЇ ДИВЕРСИФІКАЦІЇ ЕНЕРГОНОСІЇВ МАШИНИХ АГРЕГАТІВ/ Вінницький національний аграрний університет/ Техніка, енергетика, транспорт АПК. 2021
6. Lehtveer M, Brynolf S, Grahn M. What future for electrofuels in transport? Analysis of cost competitiveness in global climate mitigation. *Environ Sci Technol* 2019;53:1690–7. <https://doi.org/10.1021/acs.est.8b05243>.
7. Philipp Rungea, Christian Sölchb, Jakob Albertc, Peter Wasserscheidc, Gregor Zöttlb, Veronika Grimma. Economic comparison of different electric fuels for energy scenarios in 2035. *Applied Energy Volumes* 233–234, 1 January 2019, Pages 1078-1093.
8. Abdalla AM, Hossain S, Nisfindy OB, Azad AT, Dawood M, Azad AK. Hydrogen production, storage, transportation and key challenges with applications: a review. *Energy Convers Manag* 2018;165:602–27.
9. Acar C, Dincer I. Review and evaluation of hydrogen production options for better environment. *J Clean Prod* 2019;218:835–49.
10. Giddey S, Badwal SPS, Munnings C, Dolan M. Ammonia as a renewable energy transportation media. *ACS Sustainable Chem Eng* 2017;5:10231–9.
11. Valera-Medina A, Xiao H, Owen-Jones M, David WIF, Bowen PJ. Ammonia for power. *Prog Energy Combust Sci* 2018;69:63–102.
12. Yapicioglu A, Dincer I. A review on clean ammonia as a potential fuel for power generators. *Renew Sustain Energy Rev* 2019;103:96–108.
13. Boulamanti A, Moya JA. Production costs of the chemical industry in the EU and other countries: ammonia, methanol and light olefins. *Renew Sustain Energy Rev* 2017;68:1205–12. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.02.021>.
14. Toyne D, Schmuecker J. Our demonstration farm renewable hydrogen and ammonia generation system. 2017. p. 1–17.
15. Salián K, Strezov V. *Biofuels from microalgae*, vol. 3. Elsevier; 2017.
16. Othman MF, Adam A, Najafi G, Mamat R. Green fuel as alternative fuel for diesel engine: a review. *Renew Sustain Energy Rev* 2017;80:694–709.
17. Mohd Noor CW, Noor MM, Mamat R. Biodiesel as alternative fuel for marine diesel engine applications: a review. *Renew Sustain Energy Rev* 2018;94:127–42.
18. Kumar R, Strezov V, Lovell E, Kan T, Weldekidan H, He J, et al. Bio-oil upgrading with catalytic pyrolysis of biomass using Copper/zeolite-Nickel/zeolite and Copper-Nickel/zeolite catalysts. *Bioresour Technol* 2019;279:404–9.
19. Gonzalez-García S, Bacenetti J. Exploring the production of bio-energy from wood biomass. Italian case study. *Sci Total Environ* 2019;647:158–68.
20. Сірий О. А. Вплив параметрів струменево-нішевої системи на робочий процес пальникових пристроїв : автореф. дис. ... канд. технн. наук. : 05.14.14 – теплові та ядерні енергоустановки / Олександр Анатолійович Сірий. – Київ, 2016. – 28 с. <https://ela.kpi.ua/handle/123456789/17858>

Dulskiy A.I., Storozhuk M.S. ALTERNATIVE FUELS IN ENERGY, PROBLEMS AND PROSPECTS

The modern world faces challenges related to the growing consumption of traditional energy resources and the negative environmental consequences of this process. The gradual transition to alternative and renewable energy sources is the main promising direction of the development of world energy. Reducing the percentage of traditional energy resources in the country's energy balance in favor of sustainable and ecologically safe renewable energy sources will reduce the negative impact on the environment. Solar, wind, hydropower, biofuels, and hydrogen energy are one of the most promising areas of energy development in our country.

Types of alternative fuels may differ in their source and production process. Despite this, all of them are produced in a clean method, which is not accompanied by additional emissions of carbon dioxide (CO₂). The synthesis of alternative fuels takes place by applying two key approaches: direct utilization of excess electricity, the so-called production of "electrofuel" (EP) and thermochemical transformation of starting materials (TCP).

The work includes a review of literary sources from foreign practice regarding the use of alternative fuels in the energy sector. The main features of EP production such as: methanol, dimethyl ether, ethanol, methane are considered and their main properties are given. The conclusions regarding the prospects for the use of these fuels are summarized, and it is stated that EP is unlikely to occupy the main niche of the energy source for the needs of industrial production. Types of THP fuels are described, among which the main ones are: hydrogen, ammonia and biodiesel (BD). The main methods of production of these types of fuels, such as pyrolysis, biomass gasification, water electrolysis, are given, and the obstacles that at this stage prevent their wide implementation are described.

An important element of the technological process of using any fuel by power equipment is the proper organization of combustion technology. The article reviews domestic combustion technologies developed on the basis of scientific research at the Kyiv Polytechnic Institute. To date, one of the most common domestic burning technologies is Jet Niche Technology (SNT), the technical features of which make it possible to adapt fire engineering equipment for burning traditional and alternative fuels.

Key words: *alternative fuels, EF, biomass, hydrogen, ammonia, ethanol, combustion technology, burner device.*

Сірий О.А.

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

Кобилянська О.О.

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

ШЛЯХИ ПОКРАЩЕННЯ СТАЛОСТІ ГОРІННЯ В СТАБІЛІЗАТОРНИХ ЕЛЕМЕНТАХ ПРЯМОТОЧНИХ ПАЛЬНИКОВИХ СИСТЕМ

Сучасний світ стикається з невідкладною потребою в переході до більш екологічно чистих джерел енергії та палива. Забруднення повітря, зміна клімату та вичерпання природних ресурсів ставлять під питання стійкості нашої енергетичної системи та ресурсів майбутньої планети. В цьому контексті альтернативні гази стають невід'ємною частиною стратегії зменшення впливу на навколишнє середовище та забезпечення стійкого розвитку. Поступове залучення водневих технологій в енергетичну галузь виокремлює цей напрям як перспективний у переході до вуглецевонеїтрального виробництва. Важливим аспектом технічної реалізації впровадження водню в процеси технічного горіння залишаються питання забезпечення надійності експлуатації вогнетехнічних об'єктів (ВО) при частковій заміні основного палива воднем. З огляду на теплофізичні особливості водню та його високу реакційну здатність технічні аспекти забезпечення надійності стабілізації процесу горіння є першочерговими. Прямотокові пальники зі стабілізацією факелу на основі поганообтічних тіл розглядаються одним з перспективних напрямів розвитку промислового газопальникового устаткування. В роботі показано перспективність застосування у якості стабілізатора комбінованої схеми на основі поганообтічного тіла та газодинамічного струменевого екрану, яка реалізована у струменево-нішевій системі (СНС), що являється основним елементом однойменних промислових пальників. Представлено результати дослідження впливу основних геометричних параметрів СНС на сталість горіння газоподібного палива. Наведено експериментальні результати дослідження зривних меж («бідного» та «багатого» зриву полум'я) в залежності від конфігурації СНС. В роботі представлені експериментальні результати дослідження зривних меж при спалюванні суміші природного газу з воднем. Визначено, що спалювання суміші природного газу з воднем у відношенні 50/50 збільшує коефіцієнт регулювання СНС на 60% за рахунок розширення меж сталого горіння в області збіднених сумішей.

Ключові слова: струменево-нішевий стабілізатор полум'я, «бідний» та «багатий» зрив полум'я, стабілізація процесу горіння, параметри паливорозподілу, метано-воднева суміші.

Постановка проблеми. Останні тенденції в екологічному законодавстві, пов'язані зі скороченням викидів вуглекислого газу CO₂ та NO_x, є великим викликом для промислового сектора. Можна припустити, що конкурентоспроможність підприємств, які використовують викопне паливо, сильно залежатиме від здатності відповідати суворим екологічним нормам. Таким чином, необхідність скорочення викидів CO₂ та NO_x призвела до розробки різних технологічних рішень [1]. Одним з таких рішень є використання альтернативних видів палива. Станом на 2021 рік в Україні виробництво електроенергії відновлюваними джерелами становило 9%. Також основним залишається питання підвищення енергоефективності

паливоспалюючого обладнання в енергетиці та промисловості країни. Тут важливу роль грає підвищення енерго-екологічних характеристик застарілого парку вогнетехнічного обладнання (ВО), тобто проведення малозатратної модернізації. Це виконується шляхом: впровадження сучасних технологій спалювання; заміна тягло-дутьового обладнання на агрегати з частотним регулюванням; впровадження ефективних теплообмінників; застосування сучасних теплоізоляційних матеріалів. В даному аспекті найбільш ефективною паливоспалюючою вітчизняною технологією, яка дозволяє надійно та ефективно працювати в широкому діапазоні робочих навантажень ВО є струменево-нішева технологія (СНТ) (рисунок 1) [2].

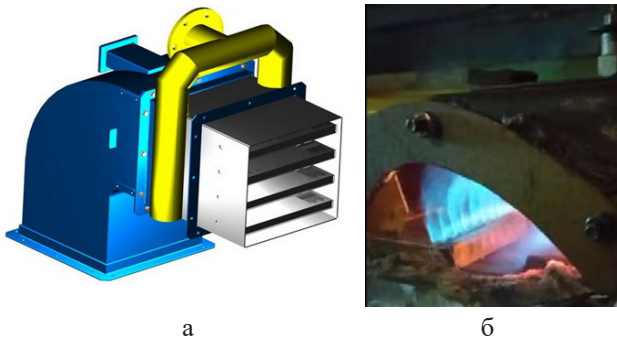


Рис. 1. Струменеві-нішева технологія спалювання палива: паливник (а), горіння суміші природного газу з воднем в СНС (б)

Поряд з проблемами, пов'язаними з необхідністю економії дефіцитних енергоресурсів, нагальними є вимоги стосовно розширення меж потужності паливних пристроїв за рахунок зниження пускових тисків палива, що також дозволяє забезпечити високі енергетичні показники агрегату та його надійну експлуатацію з можливістю глибокого розвантаження під час пусків та регулювання потужності роботи ВО. Використання високореакційної домішки (водню) до основного палива розглядається також дієвим засобом впливу на сталість горіння суміші, особливо в зоні збіднених сумішей.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Практично всі відомі зараз види палива забруднюють навколишнє середовище. Водень, що отримується з води – є одним з найбільш енергонасичених носіїв енергії. Теплотворна здатність водню у 3 рази менша від теплотворної здатності природного газу і становить 10,8 МДж/м³. При цьому енергетична цінність водню 3,2 рази менше, ніж у природного газу. Також водень має високу «запалювальну» здатність та приблизно у 10 разів більшу швидкість розповсюдження полум'я, ніж природний газ. Горючі концентрації воднево-повітряних сумішей знаходяться у межах 4–80%. Ці особливості потрібно враховувати у розрахунках паливних пристроїв у разі повного або часткового заміщення природного газу воднем [3].

Країни ЄС, США, Канада, Японія, Китай вже понад 30 років освоюють безмежний потенціал водневої енергії. Існують різні способи використання водню – світова практика показує позитивні результати при додаванні 5–10% водню до природного газу, що транспортується трубопроводним транспортом, і застосування водневих технологій для акумуляції та передачі «зеленої» енергії, виробництва металургійної, хімічної продукції, а також у транспортному секторі [4].

Результати раніше проведених досліджень показали, що нормальна швидкість розповсю-

дження полум'я U_n суміші водень-повітря лежить у діапазоні від 260 до 350 см/с. Нагадаємо, що для метану $U_n = 36$ см/с. Різниця в швидкості згорання метану і водню пов'язана з різницею в концентрації і кінетиці утворення радикалів H, O, OH, які визначають хід процесу [5].

В роботі [6] авторами виконано експериментальні дослідження характеристики згорання суміші водню та природного газу. Так, домішки водню змінювались від 0% до 50% у паливній суміші. Результати показали, що додавання водню до природного газу покращує стійкість полум'я та зменшує довжину факелу. При цьому значення температур по осі збільшуються, але це не впливає на викиди NO та CO. Однак показано, що концентрація викидів CO₂ зменшується на 30%.

Слід зазначити, що дослідження впливу домішки водню до різних традиційних та альтернативних палив залишаються актуальними і сьогодні.

Що стосується ефективності організації робочого процесу, необхідно враховувати такі характеристики: достатньо висока температура займання палива; в технологічному процесі ВО потоки повітря і палива подаються в топковий простір зі швидкостями, що досягають десятки, а часом і сотні метрів в секунду; робоча суміш повинна включати необхідну концентрацію палива в загальному об'ємі компонентів реакції (5–15% для природного газу) задля забезпечення стійкого горіння; кількість теплоти, яка виділяється в процесі реакції повинна перевищувати кількість відведеного тепла.

Для запобігання «зриву» полум'я необхідно забезпечити безперервне займання горючої суміші у фіксованих областях топкового простору. Аналіз робіт, дозволяє виділити кілька способів стабілізації фронту полум'я:

1. стабілізація за рахунок підведення енергії від зовнішнього джерела постійної дії, досягається за допомогою так званого чергового факела;
2. стабілізація за рахунок підведення енергії із зони горіння, досягається за допомогою зони зворотних струмів високонагрітих продуктів згорання, яка виникає при закрученні потоку за системою погано обтічних тіл різної геометричної форми або при гідродинамічній взаємодії течій і т. д.

Так, ефективність процесу стабілізації полум'я оцінюється рядом критеріїв: діапазон стабілізації за швидкістю потоку і коефіцієнту надлишку повітря; надійність запуску ВО з даним типом стабілізатора; ресурс пристрою стабілізації; гідравлічний опір; вплив процесу сумішоутворення на повноту згорання, протяжність зони горіння;

витрати енергії від зовнішніх джерел; простота і відносна дешевизна конструкції

Поганообтічні стабілізатори полум'я знайшли своє використання у камерах згоряння газотурбінних установок. У цьому випадку зона відриву знаходиться з підвітряної сторони погано обтічного тіла. В середині ЗЗС розміщена вихорова структура, що при обертанні створює умови для процесу масообміну з активним потоком повітря, що набігає. Межами цієї області є лінія, що обмежує циркулюючий потік з постійним масообміном. При цьому циркуляційна течія ЗЗС нестационарна. При невеликих значеннях числа Рейнольдса спостерігається періодичний відрив великих вихорів, що призводить до зміни розміру циркуляційної зони. При збільшенні чисел Рейнольдсу, течія набуває квазістационарного характеру за рахунок зменшення числа відриву вихорів ЗЗС. Експериментальні дослідження показали, що в середньому розмір зони циркуляції за погано обтічним стабілізатором в 2...2,5 рази більший за його поперечний розмір в ізотермічних умовах і збільшується при горінні [7–8].

Область стабілізації факелу в основному залежить від наступних параметрів: швидкості основного потоку, форми та розміру стабілізатору, тиску та температури потоку, інтенсивності турбулентності, якості та типу палива. Аналізуючи ці дані, слід зазначити, що найбільш широкі межі стабілізації мають тіла з найбільшим лобовим опором потокові повітря, що набігає [8].

Подібні стабілізатори полум'я мають певні недоліки. Один із головних недоліків – підвищений опір потоку газу, а також неможливість ефективно регулювати процес згоряння при зміні потужності газотурбінної установки через автономність циркуляційної течії біля стабілізатора. Також слід зазначити неможливість застосування такої конструкції в умовах обладнання, працюючого при α близьких до одиниці.

Ефективним методом стабілізації полум'я є використання перпендикулярної системи струменів разом з нішевою порожниною. Цей підхід має декілька переваг в порівнянні зі стабілізацією погано обтічними тілами. По-перше, він дозволяє плавно регулювати фізичні розміри так званого «струменевого екрану». По-друге – автономністю процесів сумішоутворення в ЗЗС, що виникає в затіненій зоні екрану і зони циркуляції в ніші на пускових режимах. Таким чином, використання такої системи є набагато більш ефективним способом стабілізації полум'я порівняно з іншими методами. Цей підхід також дозволяє

регулювати процес у більш широкому діапазоні теплових навантажень [9].

Тому, однією з перспективних задач стосовно пальників СНТ є вдосконалення геометричних характеристик СНС для забезпечення мінімізації тиску пального на пускових витратах пальника, а також встановлення впливових факторів на коефіцієнт робочого регулювання системи, з ціллю розробки рекомендацій щодо конструктивних схем пальників відповідно до використовуюваного газоподібного палива.

Метою роботи є дослідження режимів стабілізації полум'я при зміні режимних та геометричних параметрів системи стабілізації та дослідження впливу додавання високореакційного палива (водню) до основного з ціллю дослідження сталості горіння в зоні збідненої пальної суміші. Обробка результатів вимірювання з ціллю подальшої оцінки впливу на роботу пальників на базі СНС.

Виклад основного матеріалу дослідження **Дослідження впливу геометричних та режимних факторів**

Схема стабілізації факелу в досліджуваній системі наведена на рис. 2.

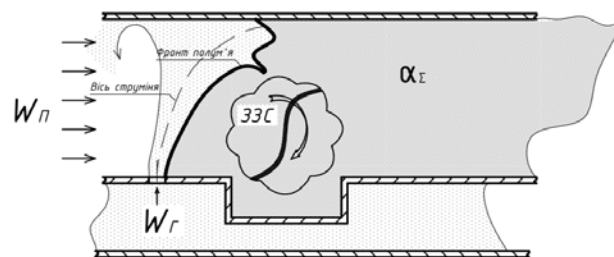


Рис. 2. Схема процесу стабілізації полум'я в СНС, W_p – швидкість повітря та палива відповідно, м/с

На основі результатів експерименту спостерігається розширення діапазону сталого горіння в СНС при збільшенні діаметру одного струменя. В цьому контексті значення коефіцієнта α суттєво відрізняються від стехіометричних, оскільки значна кількість повітря проходить транзитом у каналі не приймаючи участь у процесі горіння. В таких дослідницьких умовах максимум характеристики горіння відхиляється від стехіометрії в бік збідненої суміші та незначно зміщується при зменшенні діаметру газового сопла. Слід зазначити, що при збільшенні діаметру спостерігається розширення діапазону сталого горіння (що відображається збільшенням площі під кривими запалення та згасання). Це може бути пояснено збільшенням фізичного розміру зони циркуляції в затіненій частині струменя (рис. 3).

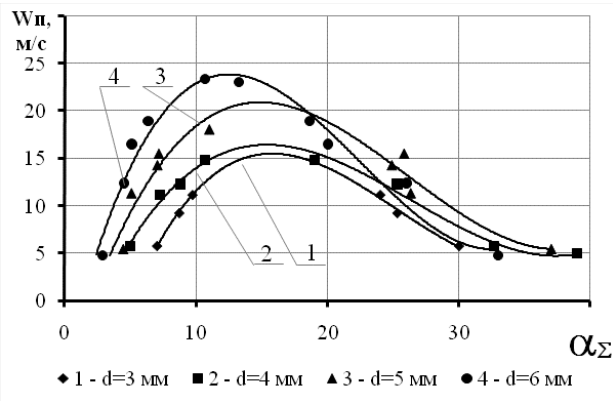


Рис. 3. Зривні характеристики одиночного газового пропан-бутанового струменя різного діаметру в умовах СНС з параметрами $L/H=40/10$, $L_1=10$ мм, висота повітряного каналу $H_k=72$ мм, α_Σ – сумарний коефіцієнт надлишку повітря у системі

Очевидно, що поодинокий струмінь не дозволяє ефективно стабілізувати полум'я і межа багатого зриву по коефіцієнту надлишку повітря становить значення 3–5 в умовах горіння пропану. На рис. 4 приведені експериментальні результати по стабілізаційним якостям СНС при переході від поодинокого струменя до системи струмин палива. Необхідно врахувати особливості взаємного впливу струмин в системі, які в загальному випадку визначаються відносним кроком розташування. Зменшення відносного кроку розташування до значень менше 2,0 призводить до з'єднання пограничних шарів окремих струменів і система наближається по характеристикам до суцільного щільного струменя. З іншого боку, збільшення відносного кроку розташування до значень 6,0 і більше призводить до мінімізації взаємодії струменів, і вони індивідуально розвиваються в потоці окисника [9].

В роботі [10] отримано рекомендації стосовно найбільш прийняттого кроку розміщення струменів палива при спалюванні природного газу. Отже, фізично картина розвитку перпендикулярних струменів в набігаючому потоці окисника з точки зору їх далекобійності при варіюванні кроку розташування при постійних значеннях швидкостей палива і окисника буде поводити себе наступним чином: при зменшенні кроку далекобійність системи буде зменшуватись, а при збільшенні, відповідно, збільшуватись.

Слід зазначити той факт, що при виборі параметру кроку розташування отворів слід врахувати стехіометричні характеристики палива. Робочий діапазон відносних кроків для СНС (відносний крок S/d , де S – крок між отворами, мм;

d – діаметр отворів газоподачі, мм) становить 2,0...5,5.

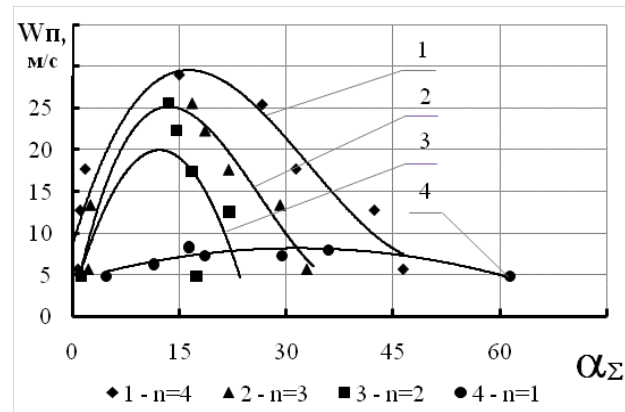


Рис. 4. Зривні характеристики СНС при переході від одиночного струменя ($m=1$) до системи струмин з параметрами $L/H=40/10$, $L_1=10$ мм, висота повітряного каналу $H_k=72$ мм, $d=2$ мм, $\bar{S} = 4,6$

Дослідження впливу вмісту водню на межі стабілізації факела в СНС

В роботі проведено дослідження спалювання природного газу та природного газу з домішкою водню в об'ємному співвідношенні 50% на 50%. На рис. 5 показано відкритий факел при спалюванні суміші газів з різним вмістом водню в пальниковому пристрої конструкції СНТ потужністю 35 кВт. З рисунку видно, що додавання водню скорочує довжину факела. Звертає на себе увагу зміна його конфігурації, що пояснюється інтенсифікацією процесу горіння. Така картина зумовлює зміну гідродинаміки потоку реагуючої суміші і на режимах підвищеного коефіцієнту надлишку повітря ($\alpha > 2,5$) призводить до розмикання суцільного факела на два окремих майже не взаємодіючих між собою факела. Зазначений режим спостерігається для сумішного палива, у той час як для природного газу така картина не характерна, оскільки стабілізація процесу горіння вимагає наявності зони зворотних струменів, що знаходиться за зривною кромкою стабілізатора пальника.

Для теоретичного опису процесу стабілізації полум'я в системі при бідному зриві (який визначається фізичною нестачею пального в об'ємі окисника для забезпечення процесу горіння) було прийнято допущення, що течія в зоні стабілізації є стаціонарною, а суміш палива, яка потрапляє в нішу за рахунок ежекції, згоряє там повністю тоді кількість тепла від продуктів згоряння можна визначити наступним чином:

$$Q_{\text{сум}} = Q_n^p \cdot G_r = Q_n^p \frac{G_{\text{п}}}{\alpha_\Sigma \cdot L_o}, \quad (1)$$

де: Q_n^p – нижча теплота спалювання палива, кДж/(м³); G_r – витрата палива, м³/с; α_Σ – сумарний

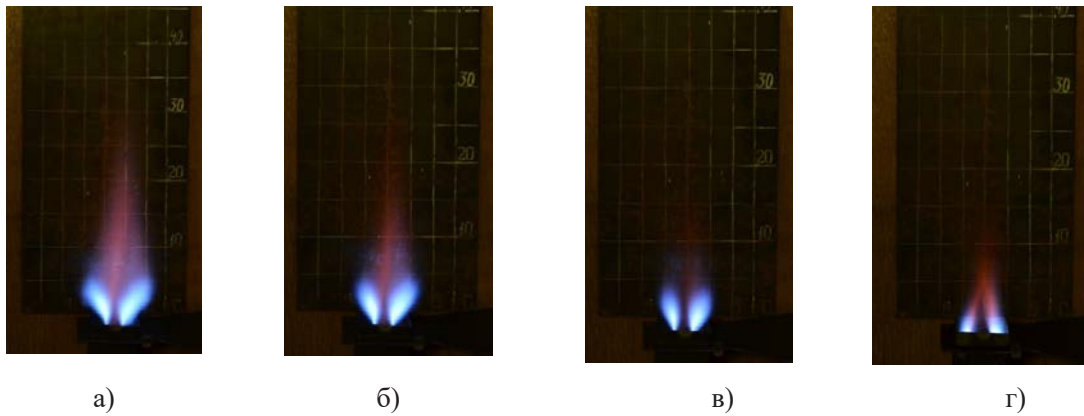


Рис. 5. Фотографії відкритого факелу в пальнику СНТ при спалюванні суміші природного газу з воднем, теплова потужність 10 кВт: а – природний газ, б – 25% водню; в – 50% водню, г – 75% водню

коефіцієнт надлишку повітря системи; L_0 – стехіометричний коефіцієнт.

Будемо вважати, що все паливо на мінімальних витратах потрапляє в нішу, тому витрату суміші в ЗЗС запишемо наступним чином:

$$G_{\text{сумЗЗС}} = G_{\text{п}} \cdot n + G_{\text{г}}, \quad (2)$$

де: $G_{\text{п}}$ – витрата повітря, $\text{м}^3/\text{с}$; $G_{\text{г}}$ – витрата палива, $\text{м}^3/\text{с}$; α_{Σ} – сумарний коефіцієнт надлишку повітря системи; n – коефіцієнт масообміну.

Враховуючи основні теплові умови в системі: кількість підведеного тепла має бути достатньою для підігріву свіжої паливо повітряної суміші до температури займання в потоці (позначимо її T_3), витрату теплоти можна записати:

$$Q_{\text{ЗЗС}} = G_{\text{сумЗЗС}} \cdot c_p \cdot (T_3 - T_{\text{сум}}), \quad (3)$$

де: $G_{\text{сумЗЗС}}$ – витрата суміші в ЗЗС, $\text{м}^3/\text{с}$; c_p – середня ізобарна теплоємність, $\text{Дж}/\text{м}^3\text{К}$; T_3 – температура займання в потоці, К ; $T_{\text{сум}}$ – температура паливо повітряної суміші, К .

Беручи до уваги всі вище зазначені припущення, отримаємо вираз для теплового балансу СНС в наступному вигляді:

$$Q_{\text{п}}^p \cdot G_{\text{г}} = G_{\text{п}} \cdot \left(\frac{1}{\alpha_{\text{ЗЗС}}} + n \right) \cdot c_p \cdot (T_3 - T_{\text{сум}}) \quad (4)$$

Коефіцієнт надлишку повітря в ЗЗС на режимі зриву полум'я розраховувався за формулою [10]:

$$\alpha_{\Sigma}^{\text{зриву}} = (x+n)^k \cdot \frac{W_0}{\left(\frac{1}{\alpha_{\text{ЗЗС}}} + L_0 \cdot n \right) \cdot c_p \cdot (T_3 - T_{\text{сум}})} - \frac{(W_{\text{п}})^m}{(100 - W_{\text{п}})^z} \quad (5)$$

На рис. 6 представлено характеристики, що описують залежність щодо визначення меж бідного зриву полум'я в умовах СНС.

Як видно, швидкість потоку повітря, що навігає, має значний вплив на межі зриву, так її збільшення звужує діапазон сталого горіння палива.

При цьому, додавання водню до основного палива значно розширює межі сталого горіння в зоні збіднених сумішей.

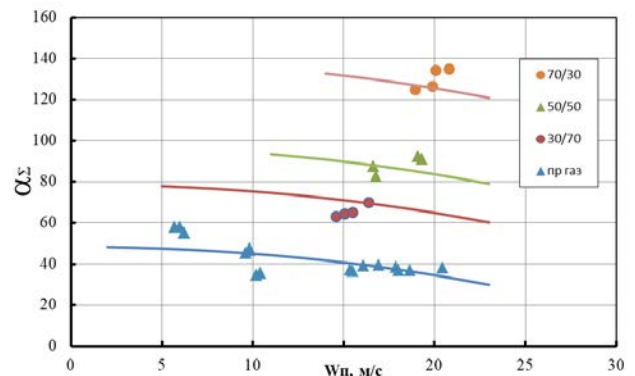


Рис. 6. Межі бідного зриву факелу в СНС при спалюванні природного газу (а) в суміші з воднем (б, в, г), $S/d=3.45$, $d=3.0$ мм, $h_{\text{к}}=85$ мм

Коефіцієнт регулювання системи визначається відношенням номінальної теплової потужності пальника до її мінімальної робочої теплової потужності. Цей коефіцієнт важливий для налаштування та оптимізації роботи автоматичних систем регулювання, так як він вказує, наскільки ефективно система реагує на зміни в параметрах. Отже, отримані результати показали, що коефіцієнт регулювання стабілізатора в діапазоні проведених досліджень збільшується на 60% і становить $K=8,3$.

Висновки. В роботі проведено огляд найпоширеніших методів стабілізації полум'я в промислових газопальниках. Наведено переваги та недоліки цих методів. Особлива увага була приділена огляду конструктивних схем пальників, що складаються зі стабілізаторів у вигляді поганообтічних тіл та схем із закруткою потоків окисника та палива. Приведено переваги застосування газодинамічної схеми стабілізації полум'я, яка працює на основі взаємодії течії ближнього сліду за

поганообтічними тілами та системи перпендикулярних струменів палива і реалізована в СНС.

Встановлена залежність геометричних характеристик системи паливорозподілу СНС на межі сталого горіння. Визначено, що:

1. Поодинокий струмінь при збільшенні його діаметру в умовах СНС здатний стабілізувати полум'я, але в при цьому зона сталого горіння зміщена в сторону збіднених сумішей, що не задовольняє вимогам реального ВО, яке працює в діапазонах близьких до стехіометричного складу паливних сумішей;

2. Перехід від поодинокого струменю до системи струмин дозволяє розширити робочий діа-

пазон СНС і максимально наближує область сталого горіння до області стехіометричних сумішей ($\alpha \rightarrow 1,0$); близькою за можливостями регулювання робочих навантажень розглядається система, що складається з 4-ох і більше струменів палива.

Експериментальні дослідження сталості горіння в СНС сумішей природного газу з воднем показали зсув межі бідного зриву в сторону розширення діапазону сталого горіння. При цьому, розширення діапазону по коефіцієнту надлишку повітря становить 35% для 30% суміші по водню, і 64% для 70% суміші по водню. Коефіцієнт регулювання стабілізатора збільшується на 60% і становить $K=8,3$ для 50% суміші.

Список літератури:

1. Marcin Dutka, Mario Ditaranto, Terese Lovas Application of a Central Composite Design for the Study of NOx Emission Performance of a Low NOx Burner, *Energies*, 2015, 8(5), 3606-3627 pp.
2. Сірий О.А., Кобылянська О. О. CFD-модельовання процесу спалювання суміші метан-водень в струменево-нішевому стабілізаторі полум'я. *XVIII Міжнародна науково-практична конференція. Теплова енергетика: шляхи реновації та розвитку.* – Київ, 2022. – С. 182-187.
3. Кривенцов О.О., Сірий О.А. Особливості горіння метано-водневих сумішей у камерах згорання ГТД. *Сучасні проблеми наукового забезпечення енергетики: праці XIX міжнародна науково-практична конференція молодих вчених та студентів (Київ, 20–23 квітня 2021 р.)*, Київ, 2021р.
4. Ніжник Н.А., Сігал О.І. Перспективи використання водню у промислових процесах спалювання, *The VI th International scientific and practical conference «About the problems of science and practice, tasks and ways to solve them» (October 26-30, 2020). Milan, Italy, 2020. 536-538 pp.*
5. Hermans. R.T.E., 2007. Laminar Burning Velocities of Methane-Hydrogen-Air Mixtures, Doctoral Thesis Technische Universiteit Eindhoven, The Netherlands.
6. Kashir B, Tabejamaat S. A numerical study on the effects of H2 addition in non-premixed turbulent combustion of C₃H₈-H₂-N₂ mixture using a steady flamelet approach. *International Journal of Hydrogen Energy*, Volume 38, Issue 23, 6 August 2013, 9918-9927.
7. Абдулін М. З., Сірий О.А. Дослідження сталості процесу горіння у струменево-нішевій системі спалювання палива. *Вчені записки Таврійського національного університету імені В. І. Вернадського. Серія: Технічні науки*, 2018. – Том 29 (68), № 1(2). – С. 55-60.
8. Абдулін М. З., Фіалко Н. М., Шеренковський Ю. В., Мєранова Н. О., Бутовський Л. С., Юрчук В. Л., Іваненко Г. В., Кліщ А. В., Тимошенко О.Б. Структура течії у системі турбулізатор – нішова порожнина. *Науковий вісник НЛТУ України*. 2017. Т.27, № 3. С. 131-135.
9. Абдулін М.З., Сірий О.А. Принципи організації робочого процесу камер згорання. *Авіаційно-космічна техніка та технологія*. 2014. № 35. С. 22–25.
10. Сірий О.А. Вплив параметрів струменево-нішевої системи на робочий процес паливних пристроїв. дис. ... канд. техн. наук : 05.14.14 / НТУУ „КПІ”. Київ, 2016. 199 с.

Siryi O.A., Kobylianska O.O. WAYS OF IMPROVING STABILITY OF COMBUSTION IN STABILIZER ELEMENTS OF DIRECT FLOW BURNER SYSTEMS

The modern world is faced with an urgent need to transition to more ecologically clean sources of energy and fuel. Air pollution, climate change and the depletion of natural resources call into question the sustainability of our energy system and the resources of the future planet. In this context, alternative gases become an integral part of the strategy of reducing the impact on the environment and ensuring sustainable development. The gradual involvement of hydrogen technologies in the energy sector singles out this direction as promising in the transition to carbon-neutral production. An important aspect of the technical implementation of the introduction of hydrogen into technical combustion processes remains the issue of ensuring the reliability of the operation of fire-engineering facilities when the main fuel is partially replaced by hydrogen. Given the thermophysical characteristics of hydrogen and its high reactivity, the technical aspects of ensuring the reliability of stabilization of the combustion process are of primary importance. Direct current burners with flame stabilization based on poorly flowing bodies are considered one of the promising directions for the development of industrial gas burner equipment. The work shows the prospects of using as a stabilizer a combined scheme based on a poor flow body and a gas-dynamic jet screen, which is implemented in a jet-niche system (JNS), which is the main element of industrial burners of the same name. The results of the study of the influence of the main geometric parameters of the JNS on the stability of combustion of gaseous fuel are presented. The experimental results of the study of the failure limits ("poor" and "rich" flame failure) depending on the JNS configuration are presented. The paper presents the experimental results of the study of the breakdown limits during the combustion of a mixture of natural gas and hydrogen. It was determined that the combustion of a mixture of natural gas and hydrogen in a ratio of 50/50 increases the JNS regulation coefficient by 60% due to the expansion of the limits of sustainable combustion in the area of lean mixtures.

Key words: jet-niche flame stabilizer; "poor" and "rich" flame failure, stabilization of the combustion process, fuel distribution parameters, methane-hydrogen mixture.

МЕТАЛУРГІЯ

УДК 669.1: 620.9

DOI <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2023.5/48>

Тесленко О.І.

Інститут загальної енергетики Національної академії наук України

Куц Г.О.

Інститут загальної енергетики Національної академії наук України

ТЕХНІКО-ЕКОНОМІЧНА ОЦІНКА ТЕХНОЛОГІЙ ЗАМІЩЕННЯ КОКСУ В ДОМЕННОМУ ВИРОБНИЦТВІ

Проведено техніко-економічну оцінку двох технологій приготування заміщувачів скіпового коксу в доменних печах, а саме: пиловугільного палива (ПВП) та горючих відновлювальних газів (доменного газу). Порівнювання ефективності цих заміщувачів проводилась за показниками повної технологічної енергоємності їх приготування до вдування в доменну піч. За результатами розрахунків встановлено, що енергоємність технології приготування пиловугільного палива у 3,54 рази більше енергоємності технології приготування доменного газу внаслідок високої енергоємності вихідної сировини (кам'яного вугілля). Відповідно, вартість приготування ПВП у 2,57 разу вища ніж доменного газу, але технологія приготування доменного газу має високі капіталовкладення у технологічну схему очищення газу від CO₂. Крім цього зазначена технологія має недостатній поширений досвід застосування процесу вдування доменного газу в доменну піч. Співвідношення повної енергетичної енергоємності розглянутих технологій приготування заміщувачів скіпового коксу у доменному виробництві та їх теплотворної здатності (калорійності): для ПВП складає 6,62%, для відновлювального (доменного) газу складає 9,45%. За останні роки у ряді країн у доменному виробництві проводяться дослідно-практичні роботи по удосконаленню технології приготування і процесу вдування доменного газу у доменну піч. Технологія вдування ПВП апробована та широко впроваджена на металургійних підприємствах як в Україні, так і в світовій практиці. Особливо привабливим напрямом розвитку цієї низьковуглецевої технології є розробки щодо електролізу водню з наступним його вдуванням разом з ДГ в доменну піч, а супутній продукт (кисень) буде додаватися до повітря дуття для інтенсифікації процесу згорання палива в доменній печі.

Ключові слова: заміщувачі коксу, технологічна енергоємність, технологія приготування, пиловугільне паливо, доменний газ.

Постановка проблеми. Проведений аналіз технологічних напрямів зменшення обсягів споживання високовартісного та високо вуглецевмісного коксу у доменному виробництві чорної металургії показав, що до таких основних технологій відносяться заміщення скіпового коксу [1, 2]. До переліку видів заміщувачів коксу вноситься природний газ, пиловугільне паливо (ПВП) та горючі відновлювальні гази (доменний газ – ДГ). В минулому столітті широко використовувався природний газ, однак внаслідок стрімкого зростання вартості природного газу (в 10-20 разів) використання його в доменному виробництві було майже припинено.

Аналіз останніх досліджень. Особливо широке застосування у доменному виробництві чорної металургії як у світовій, так і вітчизняній

практиці набула технологія вдування пиловугільного палива. В доменних цехах освоєно більше ніж у 25 розвинутих країн світу з витратами ПВП 170–200 кг на тонну чавуну. У вітчизняній металургійній галузі використання ПВП досягло 120–140 кг на тонну чавуну, що практично забезпечило відмову від використання природного газу в доменному при зниженні витрат скіпового коксу до 20 % (перший етап впровадження ПВП в металургійній галузі) [3–5]. На другому етапі реалізації технологій вдування ПВП у доменну піч передбачається досягнути витрат заміщувача до 150–250 кг на тонну чавуну, що забезпечить зниження витрат коксу на 40–50 % і значно підвищить рентабельність металургійної галузі [4]. Але, як показав досвід доменних виробництв розвинутих країн, досягнення такого рівня викорис-

тання ПВП потребує відповідних технологічних заходів, а саме: підвищення температури дуття до 1300°C та вмісту кисню в повітрі доменного дуття до 25–33 %, збагачення залізорудної шихти до рівня 62–65 % вмісту заліза, зниження основності шлаку (CaO/SiO_2) до 1–1,5 зі зниженням його утворення до $200 \div 300$ кг/т чавуну [6, 7].

Приготування ПВП здійснюється на промислових комплексах доменних виробництв металургійних підприємств з повним технологічним циклом. Піловугільні комплекси обладнані молотковими і шаровими млинами, які одночасно є сушильними агрегатами, електромагнітними сепараторами, стрічковими конверторами, приладами контролю та обліку.

За результатами роботи [5] застосування технології вдування ПВП до 180–185 кг/т чавуну забезпечило припинення використання природного газу в доменному виробництві, як заміщувача коксу, зменшило витрати скіпового коксу на 130 – 140 кг/т чавуну (28,6–31,3 %) та підвищило продуктивність доменної печі на 23,0–23,7 %.

Достатньо актуальною схемою є технологія заміщення коксу в доменній печі використанням горючих вторинних енергоресурсів, а саме: доменного газу, який є сировиною для отримання відновлювального газу після його очищення від двоокису вуглецю (CO_2). Із діючих на сьогодні методів очищення доменного газу від CO_2 в роботі розглядається метод застосування охолодженого метанолу (процес Ректизол). Перевагою зазначеного методу порівняно з іншими є його економічність, але технологія потребує громіздкого устаткування процесу очищення газу [8].

Метою дослідження є визначення та порівняльний аналіз техніко-економічних показників приготування заміщувачів скіпового коксу: піловугільного палива та відновлювального (доменного) газу.

Виклад основного матеріалу. Техніко-економічна оцінка зазначених заміщувачів скіпового коксу в доменних печах проводилась за показниками повної технологічної енергоємності їх приготування у відповідності до нормативних документів [9, 10] та науково-методичних розробок [11–12]. Для розрахунку енергоємності приготування ПВП було прийнято усереднені питомі витрати енергоресурсів піловугільними комплексами продуктивністю 10,0 і 25,0 т/год ПВП. Розрахунок повної технологічної енергоємності приготування проводився для 1 т ПВП при питомих витратах електроенергії в обсязі 48,6 кВт год, теплової енергії – 12,9 Мкал, відповідно. Результати розрахунку

надано в табл. 1, згідно яких повна технологічна енергоємність приготування ПВП складає 85,023 кг у.п./т ПВП з таким розподілом складових: енергоресурси – 18,289 кг у.п./т (21,5 % від повної енергоємності), енергоносії – 2,295 кг у.п./т (2,8 %), сировина – 64,439 кг у.п./т (75,7 %).

Для визначення енергоємності приготування ДГ питомі витрати енергоресурсів та сировини на 1000 м³ ДГ за технологією рециклінга прийнято за даними роботи [8]. Показники повної технологічної енергоємності приготування ДГ для вдування в доменну піч приведено в табл. 2, згідно яких повна енергоємність дорівнює 23,988 кг у.п./1000 м³ ДГ, у тому числі енергоресурси – 21,823 кг у.п. (90,9 % від повної енергоємності), енергоносії – 2,138 кг у.п. (8,9 %) і сировини 0,04 кг у.п. (0,02 %). Проведені дослідження на одному із металургійних заводів показали, що вдування ДГ у горн доменної печі дозволило знизити витрати коксу на 30 % та збільшити її продуктивність на 20–25 % [11]. Але впровадження зазначеного заміщувача коксу на даний час в металургійній галузі не знайшов промислової реалізації.

Порівняння показників приготування повної технологічної енергоємності та її складових заміщувачів скіпового коксу доменних печей показує, що енергоємність піловидного палива у 3,5 разу більше енергоємності колошникового газу за рахунок сировинної складової. Відсоток зниження обсягу використання скіпового коксу та ефективності доменної печі практично рівний між видами заміщувачів і складає 30 і 24 %, відповідно.

Співвідношення повної енергетичної енергоємності розглянутих технологій приготування заміщувачів скіпового коксу у доменному виробництві та їх теплотворної здатності (калорійності): для ПВП складає 6,62 % при теплотворній здатності антрацита 9000 ккал/кг, для відновлювального (доменного) газу складає 9,45 % при теплотворній здатності доменного газу 1800 ккал/м³.

Економічна ефективність заміщувачів оцінювалась за показниками повної технологічної енергоефективності їх приготування, а саме: кг у п /одиницю виміру. Перерахунок натуральних одиниць палива та енергії проводився за формулами та коефіцієнтами калорійних еквівалентів, наданих в науковій праці [13].

Визначення економічної ефективності заміщувачів скіпового коксу на 1 т чавуну за технологією приготування при вдуванні в доменну піч проводилось за наступними вихідними даними:

1. Обсяг вдування в горн доменної печі: піловугільного палива – 137 кг; відновлювального (доменного) газу – 162 м³.

Таблиця 1

**Повна технологічна енергоємність приготування пиловидного палива (ПВП)
до вдування в доменну піч, розраховано на 1 т ПВП**

Види енергоресурсів, енергоносіїв і сировини	Одиниці виміру	Обсяг витрат енергоресурсів, енергоносіїв та сировина на 1т ПВП	Повна енергоємність ПВП за складовими, кг у.п./т	Частка енергоємності складових до повної енергоємності, %
1. Енергоресурси:			18,289	21,5
– електроенергія	кВт·год	48,0	16,342	
– теплова енергія	Мкал	12,9	1,947	
2. Енергоносії			2,295	2,8
– електроенергія	кВт·год	48,6	2,090	
– теплова енергія	Мкал	12,9	0,205	
3. Сировина				
– кам'яне вугілля	кг	1100,0	64,439	75,7
4. Повна технологічна енергоємність			85,023	100

Таблиця 2

Повна технологічна енергоємність приготування доменного газу з уловлюванням CO₂ (на 1000 м³ ДГ)

Види енергоресурсів, енергоносіїв і сировини	Одиниці виміру	Обсяг витрат енергоресурсів, енергоносіїв та сировина на 1000 м ³ ДГ	Повна енергоємність відновлюваного газу, кг у. п./ 1000м ³ ДГ	Частка енергоємності складових до повної енергоємності газу, %
1. Енергоресурси:			21,823	90,98
– електроенергія	кВт·год	53,0	17,821	
– теплова енергія	Мкал	26,5	4,002	
2. Енергоносії			2,138	8,91
– електроенергія	кВт·год	0,5	1,464	
– теплова енергія	Мкал	0,08	0,674	
3. Сировина				
– метанол	кг	0,04	0,027	0,11
4. Повна технологічна енергоємність			23,988	100

Таблиця 3

Порівняння ефективності заміщувачів скіпового коксу доменних печей

Вид заміщувача коксу	Повна технологічна енергоємність	У тому числі за складовими:			Зменшення споживання скіпового коксу, %	Підвищення ефективності доменної печі, %
		енерго-ресурси	енергоносії	сировина		
Пиловугільне паливо (ПВП), кг у.п./т ПВП, (%)	85,023 (100)	18,289 (21,5)	2,295 (2,80)	64,439 (75,7)	28,6...31,8	23...23,7
Доменний газ, кг у.п./1000м ³ , (%)	23,988 (100)	21,823 (90,9)	2,138 (8,9)	0,027 (0,02)	до 30,0	20 ÷ 25

2. Повна технологічна енергоємність приготування: пиловугільного палива (на 137 кг ПВП) – 11,648 кг у.п., у тому числі енергоносії – 2,820 кг у.п.; сировина – 8,828 кг у.п., відповідно; відновлювальний газ (на 162 м³ ДГ – 3,886 кг у.п., з нього енергоресурси разом з енергоносіями – 3,886 кг у.п., сировина – 0,027 кг у.п., відповідно.

3. Вартість вугілля у 2022 році приймалась рівною 321,35 дол. США/т [14].

Перерахунок вартості вугілля з натуральних одиниць в умовні проводився за наступним алгоритмом:

$$C_{у.п.} = \frac{C_{н.у.}}{k_{екв}},$$

де $C_{у.п.}$ – вартість умовного палива;

$C_{н.у.}$ – вартість натурального палива;

$k_{екв}$ – еквівалентний коефіцієнт перерахунку натурального палива в умовне (за даними [13]).

$k_{екв}$ прийнято рівним 0,98, що відповідає маркам антрацитового і пісного вугілля, які використовуються для приготування пиловугільного палива.

Вартість вугілля в тонах умовного палива дорівнює 327,9 дол. США/т у.п.

Таблиця 4

Економічна оцінка повної технологічної енергоемності приготування заміщувачів скіпового коксу

Заміщувачі скіпового коксу	Обсяг вдування в горн доменної печі на 1 т чавуну	Повна технологічна енергоемність заміщувачів, кг у. п.	у тому числі		Вартість приготування заміщувачів, дол. США	у тому числі	
			енерго-ресурсів та енергоносіїв	сировини		енерго-ресурсів, енергоносіїв	сировини
Пиловугільне паливо (ПВП)	137 кг	11,648	2,820	8,828	3,820	0,925	2,895
Відновлювальний (доменний) газ	162 м ³	3,886	3,886	-	1,274	1,274	-

Вартість відновлювального газу прийнято рівним нулю, оскільки колошниковий (доменний) газ відноситься до горючих вторинних енергоресурсів, які використовуються в основному на металургійних підприємствах (джерелах доменного газу) і не мають ринкові вартості.

За результатами економічної оцінки приготування заміщувачів скіпового коксу (табл. 4) у обсягах для вдування в горн доменної печі вартість повної технологічної енергоемності приготування пиловугільного палива дорівнює 3,820 дол. США/137 кг ПВП (або 27,883 дол. США/1т ПВП), у тому числі енергоресурси і енергоносії – 0,925 і сировини – 2,895 дол. США, відновлювальних газів – 1,274 дол. США/162 м³ ДГ (або 7,864 дол. США/1000 м³ ДГ). Це відноситься до вартості енергоресурсів, енергоносіїв і сировини, тобто вартість приготовленого пиловугільного палива визначається головним чином енергоемністю сировини (кам'яного вугілля).

Аналіз наведених результатів розрахунку вартості технологій приготування заміщувачів скіпового коксу демонструє, що вартість приготування ПВП у 2,57 рази вища, ніж ДГ внаслідок суттєво більшої вартості вихідної сировини (кам'яного вугілля). Але, незважаючи на більш низьку вартість приготування ДГ, як заміщувача скіпового коксу порівняно з ПВП, процес вдування відновлювальних газів в доменному виробництві чорної металургії України, так і у розвинутих країнах, поки що не знайшов застосування. Це пов'язано з відносно значними капіталовкладеннями у технологічне устаткування та відсутністю промислового досвіду вдування ДГ в доменну піч. За останні роки проводиться удосконалення технології очищення ДГ методом глибокої рекуперації регенеруючого розчину, що знижує енергетичні витрати у 2,0–2,5 рази без збільшення капіталовкладень і, як результат, підвищує актуальність

застосування відновлюваних газів у доменному виробництві [15].

Особливо привабливим напрямом розвитку цієї низьковуглецевої технології є розробки щодо електролізу водню з наступним його вдуванням разом з ДГ в доменну піч, а супутній продукт (кисень) буде додаватися до повітря дуття для інтенсифікації процесу згорання палива в доменній печі [16, 17].

Висновки. Проведена техніко-економічна оцінка ефективності застосування заміщувачів скіпового коксу у доменних печах за показниками їх повної технологічної енергоемності їх приготування показала наступне:

- повна технологічна енергоемність технології приготування ПВП у 3,54 рази більша технології приготування відновлювального (доменного) газу – 85,023 кг у.п./1 т ПВП проти 23,988 кг у.п./1000 м³ ДГ, відповідно;

- висока технологічна енергоемність ПВП порівняно з енергоемністю ДГ обумовлена високою енергоемністю вихідної сировини (кам'яного вугілля);

- внаслідок цього вартість приготування ПВП у 2,57 рази більша, ніж відновлювального газу (3,82 дол. США/137 кг ПВП проти 1,274 дол. США/162 м³ ДГ, відповідно у обсягах вдування в доменну піч);

- технологія вдування відновлювального газу поки що не знайшла широкого застосування в доменному виробництві України та у розвинутих країнах світу з причин високих капіталовкладень у технологічну схему та відсутність достатнього промислового досвіду процесу його вдування в доменну піч;

- за останні роки у доменному виробництві ряду країн проводиться удосконалення технології приготування відновлювального газу, що дає надію на широке застосування даного заміщувача скіпового коксу.

Список літератури:

1. Смірнов О. М., Тімошенко С. М., Нарівський А. В. Відновлення та інноваційний розвиток виробництва сталі в Україні в контексті енергоефективності та європейського зеленого курсу. *Вісн. НАН України*. 2023. № 4. С. 23 – 38. DOI: <https://doi.org/10.15407/visn2023.04.021>
2. Тесленко О.І., Куц Г.О. Структурні та технологічні напрями зменшення викидів парникових газів підприємствами чорної металургії. *Вчені записки Таврійського національного університету В.І. Вернадського. Серія: Технічні науки*. 2022. 33 (72), №6. С. 165–173. DOI: <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2022.6/27>
3. Best Available Techniques (BAT) Reference Document for Iron and Steel Production. European Commission. Joint Research Centre & Institute for technological studies. 2013. URL: <http://eippcb.jrc.ec.europa.eu> (дата звернення: 20.08.2023).
4. Zhang W., Wang Z.Y., Wang X.L., Zhang L.G. Experimental study of pulverized coal added dust injection into blast furnace. The 9th CSM Steel Congress Proceeding. Beijing. 2009.
5. Ярошевський С.Л., Ємченко О.В., Попов В.Є. та ін. Ефективність та перспективи заміни природного газу пиловугільним паливом у доменних печах України. *Метал та лиття України*. 2010. №7. С. 13–20.
6. Назюта Л. Ю. До питання ефективності технології вдування ПВП в умовах металургійних підприємств України. *Метал та лиття України*. 2014. №1 (248). С. 3–14.
7. Van der Stel J. et al. Developments of the ULCOS low CO₂ blast furnace process at the LKAB Experimental BF in Luleå. 1st Intern. Conf. on Energy Efficiency and CO₂ Reduction in the Steel Industry (EECR). Dusseldorf, Germany. 27 June – 1 July 2011.
8. Чайка О.Л. Аналіз тенденцій розвитку уявлень та технологій, спрямованих на зменшення емісії діоксиду вуглецю в доменному виробництві/ О.Л. Чайка, Б.В. Корнілов, О.Є. Меркулов, А.О. Москалина, В.В. Лебідь, Ізюмський М.М.// *Метал та лиття України*. 2022. Т.30. №2 (329). С. 8–19. DOI: <https://doi.org/10.15407/steelcast2019.10.064>
9. ДСТУ 3682-98 (ГОСТ 30583-98) Енергозбереження. Методика визначення повної енергоємності продукції, робіт, послуг. Держстандарт України. Київ. 1998. 11 с.
10. ДСТУ 3740-98. Енергозбереження. Методи аналізу та розрахунку зниження витрат палива та енергії на металургійних підприємствах. Держстандарт України Київ. 1999. 11 с.
11. Hiroshi Nogami, Jun-ichiro Yagi, Shin-ya Kitamura, Peter Richard Austin. Analysis on Material and Energy Balances of Ironmaking Systems on Blast Furnace Operations with Metallic Charging, Top Gas Recycling and Natural Gas Injection. ISIJ International. 2006. V.46. № 12. Pp.1759–1766. DOI: <https://doi.org/10.2355/isijinternational.46.1759>
12. Maliarenko O., Horski V., Stanytsina V., Bogoslavsk O., Kuts H. (2020). An improved approach to evaluation of the efficiency of energy saving measures based on the indicator of products total energy intensity. *Studies in Systems, Decision and Control* 298, 201–216. DOI:10.1007/978-3-030-48583-2_13
13. Куц Г.О., Галіновський Є.І., Мельник В.І. Методичні положення щодо визначення теплоти згорання палива та перерахунку електро- і теплоенергії з натуральних одиниць на умовне паливо. *Проблеми загальної енергетики*. 2004. № 11. С. 53–59.
14. Енергомоніторинг / Енергобізнес. 04.2022, Expro Ellectricity URL: <http://expro.com.ua> (дата звернення: 21.08.2023).
15. Катаєв А.А. Досвід та перспективи енергозбереження ресурсомістких підприємств чорнометалургійного комплексу України. *Економіка України*. 2013. №9 (614). С. 18–30.
16. Томаш М. О., Сущенко А.В. Застосування пароводяної конверсії природного газу в доменному виробництві. *Вісник Приазовського державного технічного університету. Серія: Технічні науки*. 2011. Вип. 22. С.31–35.
17. A new way to clean up the steel industry. *The Economist*. Feb 15th 2023. URL: <https://www.economist.com/science-and-technology/2023/02/15/a-new-way-to-clean-up-the-steel-industry> (дата звернення: 21.08.2023).

Teslenko O.I., Kuts H.O. TECHNICAL AND ECONOMIC ASSESSMENT OF THE COKE SUBSTITUTION TECHNOLOGIES IN THE BLAST FURNACE PRODUCTION

A technical and economic evaluation of two technologies for the preparation of substitutes for skip coke in blast furnaces, namely: pulverized coal fuel (PCF) and combustible reducing gases (blast furnace gas), was carried out. The comparison of the efficiency of these substitutes was carried out according to the indicators of the full technological energy intensity of their preparation before blowing into the blast furnace. Based on the results of the calculations, it was established that the energy intensity of the pulverized coal fuel preparation technology is 3.54 times greater than the energy intensity of the furnace gas preparation technology due to the high energy intensity of the raw material (hard coal). Accordingly, the cost of PCF preparing is 2.57 times higher than that of blast furnace gas, but the technology of blast furnace gas preparation has high capital

investments in the technological scheme of gas purification from CO₂. In addition, the specified technology has insufficient widespread experience in the process of blowing blast furnace gas into a blast furnace. The ratio of the total energy intensity of the considered technologies for the preparation of skip coke substitutes in blast furnace production and their calorific value (calorific value): for PCF is 6.62%, for reducing (blast) gas is 9.45%. In recent years, in a number of countries, experimental and practical work has been carried out in blast furnace production to improve the technology of preparation and the process of blowing blast furnace gas into the blast furnace. The PCF blowing technology has been tested and widely implemented at metallurgical enterprises both in Ukraine and in global practice. A particularly attractive direction of development of this low-carbon technology is the development of electrolysis of hydrogen followed by its injection together with blast furnace gas into the blast furnace, and the by-product (oxygen) will be added to the blast air to intensify the fuel combustion process in the blast furnace.

Key words: coke substitutes, technological energy intensity, preparation technology, pulverized coal fuel, blast furnace gas.

ХІМІЧНІ ТЕХНОЛОГІЇ

УДК 665.338, 665.584.2

DOI <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2023.5/49>

Андріянова М.В.

ДВНЗ «Український державний хіміко-технологічний університет»

Головенко В.О.

ДВНЗ «Український державний хіміко-технологічний університет»

Руднєва Л.Л.

ДВНЗ «Український державний хіміко-технологічний університет»

Сухий К.М.

ДВНЗ «Український державний хіміко-технологічний університет»

РОЗРОБКА ТЕХНОЛОГІЇ ЕКСТРАГУВАННЯ ОЛІЇ КАШТАНУ КІНСЬКОГО З ПОДАЛЬШИМ ВИКОРИСТАННЯМ ЇЇ В РЕЦЕПТУРІ КРЕМУ ДЛЯ РУК

У сучасному світі люди щодня стикаються з найрізноманітнішими зовнішніми подразниками, які знищують тонку захисну плівку на поверхні шкіри, залишаючи її незахищеною. Сухість шкіри може бути викликана безліччю різних причин, при цьому кількість рідини, що виробляється шкірою, виявляється недостатньо для її зволоження, шкіра стає сухою, шорсткою, може тріскатися і навіть кровоточити. Для покращення захисних властивостей запропоновано рецептуру крему для рук з додаванням олії кінського каштану як функціонального компоненту. Олію отримали в процесі екстрагування з каштану кінського гексаном та ізопропіловим спиртом у стаціонарному шарі в апараті Сокслета. Як екстрагенти були використані розчинники гексан та ізопропіловий спирт. Досліджено вплив ступеня подрібнення частинок рослинної сировини на вихід екстрагованої олії. Встановлено, що зі зменшенням фракції вихід продукту збільшується, але зменшення фракції нижче ніж 1–2 мм не призводить до подальшого збільшення виходу. Показано, що в процесі екстракції інтенсивне вилучення компонентів з каштану кінського звичайного відбувається до 360 хв., подальше підвищення часу майже не впливає на вихід продукту. Визначено йодне число, кислотне число, естерне число, число омилення, показник заломлення для екстрактів, за результатами чого встановлено, що отримані продукти знаходяться на межі між невисихаючими і напіввисихаючими жирними оліями. Отримано математичну модель процесу екстракції рослинної олії з каштану кінського гексаном у вигляді рівняння множинної регресії першого порядку. Встановлено, за допомогою повного 4-ьох факторного експерименту, що фракційний склад в межах від 1 мм до 5 мм не впливає на вихід продуктів екстрагування гексаном. Найбільший вплив на вихід продуктів має співвідношення гексану до наважки каштану. Вплив температури екстракції зі збільшенням часом процесу зменшується. При використанні такого функціонального компоненту, як олія каштану було виявлено, що крем для рук на її основі має матуючий ефект, чинить протизапальну та антибактеріальну дію, нормалізує роботу сальних залоз, тонізує шкіру.

Ключові слова: екстракція, каштан кінський, ступінь подрібнення, розчинники, каштанова олія, крем для рук.

Постановка проблеми. Рослинні олії – основна сировина, що використовується для виробництва біодизеля, лікарських, косметичних препаратів та ін. [1]. Стрімкий розвиток різних галузей промисловості потребує не лише збільшення обсягів виробництва олій з традиційної рослинної

сировини (соняшникової, ріпакової, соєвої, пальмової та інших олій), але й пошук та збільшення обсягів добування цільових продуктів з рослинної сировини нетрадиційного призначення. Прикладом такої сировини є каштан кінський, жолуді та ін. [2].

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Каштан кінський звичайний широко розповсюджений на території нашої країни. Крім того, він має унікальний хімічний склад, високу харчову і біологічну цінність, містить широкий спектр фізіологічно функціональних інгредієнтів. Тому використання рослинної олії та інших цільових продуктів з цієї сировини є важливим для фармакологічної, косметичної, сільськогосподарської та інших галузей промисловості [3, 4].

В основному жири, олії та інші цільові продукти на сучасних виробництвах отримують методами настоювання, пресування, екстрагування або їх комбінацією. В процесі механічного пресування у шроті залишається близько 15 % олії. Глибоке вилучення олії можливе у два етапи: механічне пресування насіння і подальше екстрагування олії із одержаного шроту.

Проблематика вилучення олії здебільшого зумовлена структурою насіння, що нерідко характеризується наявністю тонкої плівки, яка захищає зерно від навколишнього середовища. Тому видалення цільових компонентів із рослинної сировини порівняно з мінеральними речовинами є набагато складнішим процесом і потребує відповідної технології для підвищення ефективності.

Метою статті є дослідження процесу екстракції рослинної олії з каштану кінського та отримання математичної моделі процесу, з подальшим впровадженням отриманої олії як функціонального компоненту у рецептурі крему для рук.

Виклад основного матеріалу. Екстрагування здійснювали у апараті Сокслета. Як екстрагенти були використані розчинники гексан та ізопропіловий спирт. Для визначення показників якості отриманих рідких продуктів використовували стандартні методи. Йодне число визначали за ДСТУ ISO 3961:2004, кислотне число – ДСТУ 4350:2004, число омилення – ДСТУ ISO 3657:2004, показник заломлення – ДСТУ 4492:2005 та молекулярну масу криоскопічним методом.

Математичну модель процесу екстракції рослинної олії з кінського каштану гексаном отримали у вигляді поліному першого порядку. Для розрахунку коефіцієнтів рівняння регресії, тобто залежності виходу продуктів екстрагування $Y = f(\phi, m, \tau, t)$ від розміру фракції (ϕ), співвідношенню гексану до наважки каштану (m), часу (τ) та температури екстрагування (t) вибрали повний факторний експеримент.

Досліджуючи процес екстракції у апараті Сокслета, експериментальні данні показали, що про-

тягом екстракції концентрація олії збільшується для кожної фракції та розчинника (табл. 1, 2). У процесі екстракції інтенсивне вилучення компонентів олії відбувається до 360 хвилин. Далі концентрація олії у зразку практично не змінюється. Також слід відмітити, що спостерігається незначний позитивний вплив ступеня подрібнення сировини на вихід олії від розміру фракції. Це свідчить про те, що з подрібненням збільшується поверхня контакту фаз. Із зменшенням розміру фракції збільшується концентрація олії в пробах та вихід продукту. Однак зменшення розміру фракцій сировини пов'язане із зростанням енергозатрат на реалізацію процесу, а саме на подрібнення. Тому необхідно визначити оптимальні умови процесу, враховуючи вплив дисперсності на механізм вилучення цільового компоненту.

Таблиця 1
Результати екстракції олії каштану кінського звичайного ізопропіловим спиртом

Час, хв	С, г/л		
	до 0,25 мм	1 – 2 мм	5 – 7 мм
120	15,86	21,24	9,47
240	18,57	21,34	13,54
360	19,73	21,47	17,84
480	19,78	21,57	17,93

Таблиця 2
Результати екстракції олії каштану кінського звичайного гексаном

Час, хв	С, г/л		
	до 0,25 мм	1 – 2 мм	5 – 7 мм
120	3,57	4,21	2,60
240	5,25	5,81	4,21
360	8,13	8,51	5,34
480	8,12	8,58	5,42

Таблиця 3
Характеристика продуктів, отриманих при екстрагуванні

	Гексаном	Ізопропіловим спиртом	Олія каштану кінського звичайного (промислова)
Кислотне число, мг КОН/г	7,29	4,33	5,59
Число омилення, мг КОН/г	176,00	224,00	204,00
Ефірне число, мг КОН/г	168,71	219,67	198,41
Йодне число, г I ₂ /100 г	104,80	103,76	94,80
Показник заломлення	1,474	1,451	1,474
ММ	764,5954	-	888,6509

Для продуктів, отриманих після дистиляції міцели, було визначено основні характеристики рослинних олій, дані яких представлено у таблиці 3. Зважаючи на дані КЧ, ЙЧ та інших характеристик, отримані продукти знаходяться на межі між невисихаючими і напіввисихаючими жирними оліями. Це не суперечить даним літератури про значення йодного числа жирної олії з каштану кінського звичайного, яке знаходиться в межах 90–109.

Досліджуючи математичну модель процесу екстракції рослинної олії з каштану кінського гексаном оцінювали значимість коефіцієнтів рівнянь регресії перевіряли при рівні ризику 0,05 за допомогою t-критерію Стьюдента.

Функція відклику, яка відображає залежність виходу продуктів екстрагування від розміру фракції (ϕ), співвідношенню гексану до наважки каштану (m), часу (τ) та температури екстрагування (t) за результатами проведеного повного факторного експерименту в кодованих значеннях змінних факторів набула такого вигляду:

$$Y = 14,625 + 4,875 \cdot x_2 + 4,875 \cdot x_3 + 1,875 \cdot x_4 + 1,625 \cdot x_2 \cdot x_3 + \dots \quad (1)$$

Для отримання рівняння регресії в натуральному вигляді визначили основний (нульовий) рівень для кожного технологічного параметру процесу екстрагування та його інтервал варіювання:

– розмір фракції (ϕ , мм);

$$X_{1_0} = \frac{5+1}{2} = 3, \Delta X_1 = \frac{5-1}{2} = 2;$$

співвідношенню гексану до наважки каштану (m , г/г);

$$X_{2_0} = \frac{20+10}{2} = 15, \Delta X_2 = \frac{20-10}{2} = 5;$$

час екстрагування (τ , хв);

$$X_{3_0} = \frac{80+40}{2} = 60, \Delta X_3 = \frac{80-40}{2} = 20;$$

температура екстрагування (t , °C).

$$X_{4_0} = \frac{40+20}{2} = 30, \Delta X_4 = \frac{40-20}{2} = 10.$$

Для перекодування значень технологічних параметрів процесу екстрагування після підстановки в формулу величин основного рівня та інтервалу варіювання вона набуває вигляду для відповідних факторів:

– розмір фракції (ϕ , мм);

$$x_1 = \frac{\phi - 3}{2}, \quad (2)$$

– співвідношенню гексану до наважки каштану (m , г/г);

$$x_2 = \frac{m - 15}{5}, \quad (3)$$

– час екстрагування (τ , хв);

$$x_3 = \frac{\tau - 60}{20}, \quad (4)$$

– температура екстрагування (t , °C).

$$x_4 = \frac{t - 30}{10}. \quad (5)$$

Після підстановки виразів (2)–(5) в (1), проведення перетворень і спрощень рівняння регресії в натуральних величинах технологічних параметрів набувають такого вигляду:

$$Y = m(0,035\tau + 0,05t - 0,000625\tau t - 1,5) \quad (6)$$

Після перевірки адекватності отриманої моделі даному технологічному процесу екстрагування за F-критерієм Фішера виявилось, що F_p менше $F_{табл.}$, то гіпотеза про адекватність рівнянь регресії була прийнята.

З отриманих рівнянь регресії як в кодованих значеннях змінних факторів (6), так і в натуральних величинах технологічних параметрів (6) видно, що розмір фракції у межах 1–5 мм не впливає на вихід продуктів екстракції з каштану кінського гексаном.

Отримане рівняння регресії в кодованих та натуральних величинах може використовуватися для розрахунку виходу продукту екстрагування у залежності від співвідношення гексану до наважки каштану (m), часу (τ) та температури екстрагування (t), які відповідно знаходяться в таких межах:

– співвідношенню гексану до наважки каштану (m , г/г);

$$10 \leq m \leq 20;$$

– час екстрагування (τ , хв);

$$40 \leq \tau \leq 80;$$

– температура екстрагування (t , °C).

$$20 \leq t \leq 40.$$

Для дослідження впливу технологічних параметрів процесу екстрагування (змінних факторів) на вихід продуктів екстрагування побудували поверхні відгуку в залежності від двох змінних факторів (третій фактор знаходився на постійному нижньому рівні, основному (нульовому) рівні або верхньому рівні).

З отриманого рівняння та графіків 1–3 видно, що на вихід продуктів екстрагування впливає співвідношенню гексану до наважки каштану (m , г/г), час (τ , хв) та температура екстрагування (t , °C). При цьому максимальний вихід продуктів екстрагування спостерігається при максимальному значенні цих факторів.

Також слід відмітити, що при збільшенні часу екстрагування вплив температури процесу на вихід продуктів зменшується при всіх співвідношеннях гексану до наважки каштану (рис. 1). При збільшенні часу екстрагування до 80 хв. температура процесу в межах досліду (20–40°C) на вихід продуктів не впливає (рис. 1 та 2 в). Аналізуючи коефіцієнти рівняння регресії можна зробити висновок, що температура на вихід продуктів

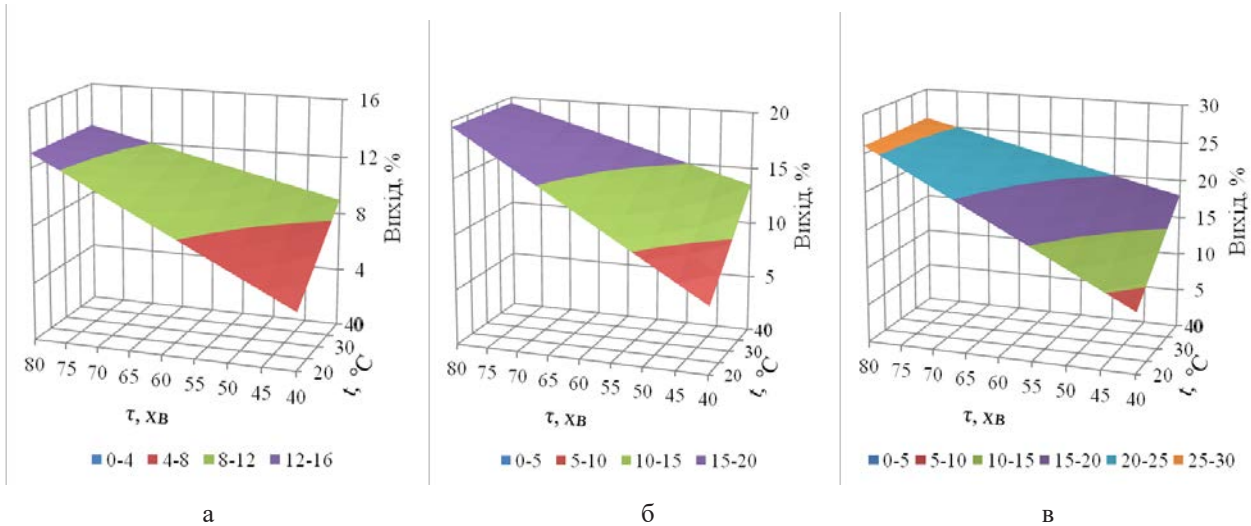


Рис. 1. Залежність виходу продуктів екстрагування гексаном від тривалості та температури процесу при фіксованому співвідношенню гексану до наважки каштану: а – $m=10$ г/г, б – $m=15$ г/г, в – $m=20$ г/г

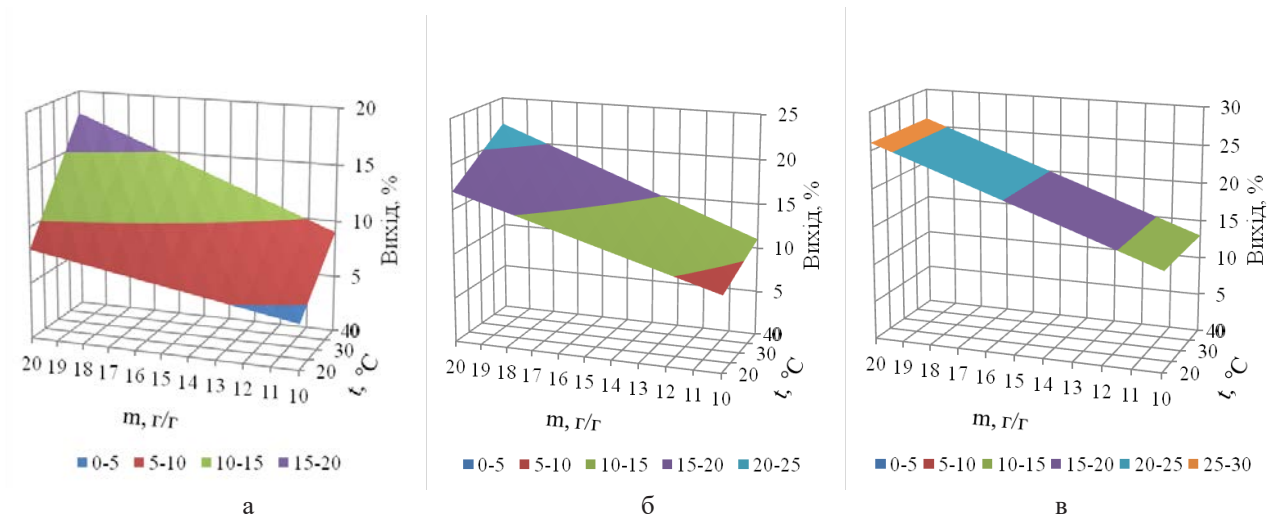


Рис. 2. Залежність виходу продуктів екстрагування гексаном від співвідношенню гексану до наважки каштану та температури процесу при фіксованій тривалості процесу: а – $\tau=40$ хв., б – $\tau=60$ хв., в – $\tau=80$ хв

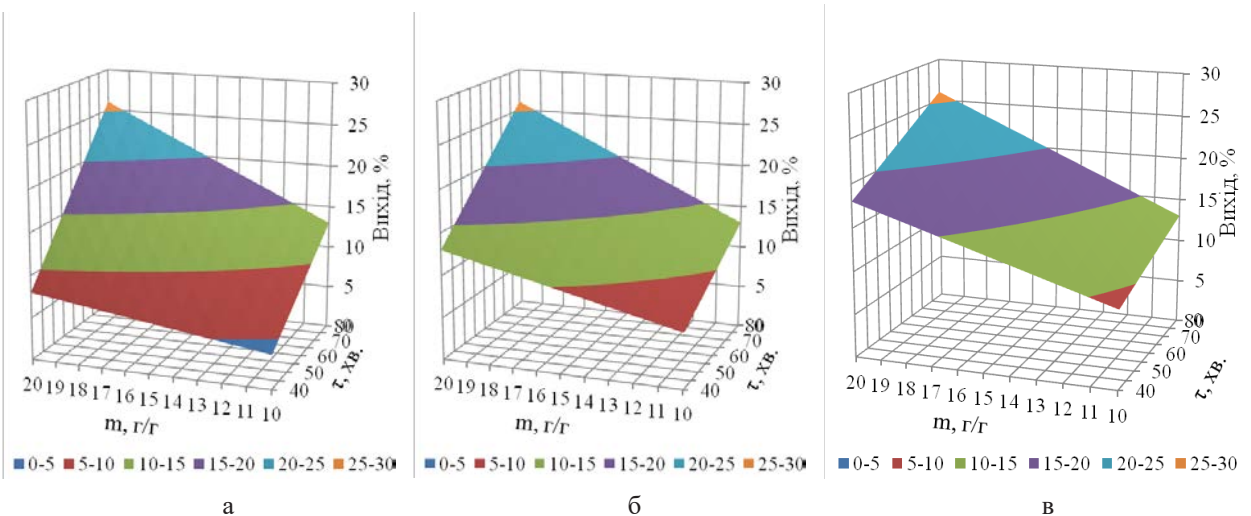


Рис. 3. Залежність виходу продуктів екстрагування гексаном від співвідношенню гексану до наважки каштану та тривалості процесу при фіксованій температурі процесу: а – $t=20^{\circ}\text{C}$, б – $t=30^{\circ}\text{C}$, в – $t=40^{\circ}\text{C}$

Порівняння органолептичних показників зразків розроблених косметичних кремів відповідно ДСТУ 4765:2007

Кількість олії каштану кінського, %	Органолептичні показники зразків крему	pH	Відповідність ДСТУ 4765:2007
0,02	Однорідна кремоподібна маса без сторонніх домішок, білого кольору	4,74	+ / –
0,2	Однорідна кремоподібна маса без сторонніх домішок, білого кольору	6,53	+
1	Однорідна кремоподібна маса без сторонніх домішок, білого кольору	7,68	+
2	Однорідна кремоподібна маса без сторонніх домішок, блідо-жовтого кольору	8,11	+
5	Однорідна кремоподібна маса без сторонніх домішок, жовтого кольору	9,48	+ / –

екстрагування впливає на початку процесу в 1,4 рази суттєвіше, але з часом цей вплив зменшується.

На початку експерименту чим більше співвідношення гексану до наважки каштану, тим більший вплив на вихід продукту екстрагування має температура (рис. 2). Чим менше температура процесу екстрагування, тим більше впливає час процесу на вихід продуктів (рис. 3). Також слід відмітити, що вплив співвідношенню гексану до наважки каштану на вихід продуктів екстрагування суттєво не залежить від температури та часу процесу.

На другому етапі роботи було виготовлено косметичні креми для рук та було визначено вплив функціональних компонентів в кількостях 0,2; 0,4; 0,6; 1; 2 та 5 % (табл. 4).

Всі креми за консистенцією є однорідними (без згустків, грудочок, розшарувань) та стабільні. Креми легко видавлюються з туб і легко наносяться на поверхню шкіри та швидко нею поглинаються. Встановлено, що оптимальним є додавання олії кінського каштану у рецептуру крему для рук у кількості від 0,2 до 2 %. Подальше збіль-

шення кількості олії каштану кінського призводить до збільшення pH, що не відповідає вимогам ДСТУ 4765:2007 та буде мати негативний вплив на шкіру людини.

Висновки і перспективи подальших досліджень у даному напрямі. В роботі показано, що для екстракції олії з каштану кінського оптимальною є ступінь подрібнення не більше 5 мм. Встановлено, що гексан як екстрагент рослинної олії кращий, ніж ізопропіловий спирт. За допомогою повного 4-ьох факторного експерименту встановлено, що фракційний склад в межах від 1 мм до 5 мм не впливає на вихід рослинної олії з каштану кінського при екстрагуванні гексаном. Показано, що найбільший вплив на вихід продуктів має співвідношення гексану до наважки каштану. При цьому зі збільшенні часу процесу екстракції вплив температури зменшується. Запропоновано використання олії кінського каштану у рецептурі крему для рук. Встановлено, що зразки кремів відповідають вимогам нормативних документів, а також отримані креми мають матуючий ефект та чинять протизапальну та антибактеріальну дію.

Список літератури:

1. Chekhova, I. World trends of oil market development. *The Economic Discourse*. 2021. (3), 54–62. <https://doi.org/10.36742/2410-0919-2020-3-6>
2. Jurek, I., Szuplewska, A., Chudy, M., Wojciechowski, K. Effect of the oat, horse chestnut, cowherb, soy, quinoa and soapwort extracts on skin-mimicking monolayers and cell lines. *Journal of surfactants and detergents*. 2022. 25(2), 185-192. <https://doi.org/10.1002/jsde.12553>
3. Syed, I.R., Sukhcharn, S., Saxena, D.C. Evaluation of Physical and Compositional Properties of Horse-chestnut (*Aesculus indica*) Seed. *Journal of Food Processing Technology*. 2016. 7 (3), 561-567. <https://doi.org/10.4172/2157-7110.1000561>
4. Brestensky, M., Nitrayova, S., Patraš, P., Heger, J., Nitray, J. Effect of the supplementation linseed oil, inulin and horse chestnut into a high fat diet on the fatty acid profile of pigs. *Ciencia Rural*. 2016. 46(11), 1992-1997. <https://doi.org/10.1590/0103-8478cr20151382>.

Andriianova M.V., Holovenko V.O., Rudnieva L.L., Sykhyy K.M. DEVELOPMENT OF HORSE CHESTNUT OIL EXTRACTION TECHNOLOGY WITH ITS FURTHER USE IN THE HAND CREAM RECIPE

In today's world, people daily encounter a wide variety of external irritants that destroy the thin protective film on the surface of the skin, leaving it unprotected. Dry skin can be caused by many different reasons, while the amount of fluid produced by the skin is not enough to moisturize it, the skin becomes dry, rough, can crack and even bleed. To improve the protective properties, a hand cream formulation with the addition of horse chestnut oil as a functional component is proposed. The oil was obtained in the process of extraction from horse chestnut with hexane and isopropyl alcohol in a stationary layer in a Soxhlet apparatus. Solvents hexane and isopropyl alcohol were used as extractants. The effect of the degree of grinding of plant material particles on the yield of extracted oil was studied. It was established that with a decrease in the fraction, the yield of the product increases, but a decrease in the fraction below 1–2 mm does not lead to a further increase in the yield. It is shown that in the process of extraction, intensive extraction of components from horse chestnut takes place up to 360 min., further increase in time has almost no effect on the output of the product. The iodine number, acid number, ester number, saponification number, and refractive index of the extracts were determined, as a result of which it was established that the obtained products are on the border between non-drying and semi-drying fatty oils. A mathematical model of the process of extracting vegetable oil from horse chestnut with hexane in the form of a first-order multiple regression equation was obtained. It was established, with the help of a complete 4-factor experiment, that the fractional composition in the range from 1 mm to 5 mm does not affect the yield of the products of extraction with hexane. The ratio of hexane to the weight of chestnut has the greatest influence on the product yield. The influence of the extraction temperature decreases with increasing process time. When using such a functional component as chestnut oil, it was found that the hand cream based on it has a matting effect, has an anti-inflammatory and antibacterial effect and tones the skin.

Key words: extraction, horse chestnut, grinding degree, solvents, chestnut oil, hand cream.

УДК 620.3: 66.061.34 + 543.9
DOI <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2023.5/50>

Воробйова В.І.

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

Хрокало Л.А.

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

Віннічук Е.В.

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

Кравченко Ф.Е.

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

Федулова В.С.

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

Васильєв Г.С.

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

Скиба М.І.

ДВНЗ «Український державний хіміко-технологічний університет»

СИНТЕЗ НАНОЧАСТИНОК ЗОЛОТА З ВИКОРИСТАННЯМ ЕКСТРАКТУ ПРОДУКТІВ ПЕРЕРОБКИ ВИНОГРАДУ НА ОСНОВІ НИЗЬКОТЕМПЕРАТУРНОГО ЕВТЕКТИЧНОГО РОЗЧИННИКА, ЇХ АНТИБАКТЕРІАЛЬНІ ВЛАСТИВОСТІ ТА ТОКСИЧНІСТЬ

У статті представлено новий спосіб синтезу наночастинок золота з використанням екстракту вижимок винограду, отриманого низькотемпературним евтектичним розчинником – суміші проліну та молочної кислоти у молярному співвідношенні 1:2. Даний спосіб є екологічно безпечним та не передбачає використання токсичних реагентів. Утворення наночастинок та їх оцінку їх властивостей проводили за допомогою сканувальної електронної мікроскопії, спектрометричного елементного аналізу, методом інфрачервоної спектроскопії з перетворенням Фур'є та ультрафіолетової спектроскопії. Встановлено, що розмір наночастинок варіюється в межах 6,5–9,1 нм, з середнім 7,4 нм. На УФ-спектрі спостерігається поверхневий плазмонний резонанс, що підтверджує присутність наночастинок. Методом інфрачервоної спектроскопії встановлено функціональні групи органічних природних сполук, що присутні в екстракті вижимки винограду та беруть участь у синтезі наночастинок золота. Зменшення інтенсивності поглинання в області 1600–1400 см⁻¹ вказує на залучення ОН – груп у стабілізацію наносистеми.

Проведено дослідження антибактеріальних властивостей наносистеми диско-дифузійним методом на поживному агарі з використанням культур бактерій: грамнегативної палички *Escherichia coli*, грампозитивної спороутворюючої палички *Bacillus subtilis* та дріжджового грибка *Candida albicans*. Система показала інгібуючу дію на усі три досліджені культури з чітко вираженими зонами інгібування 4–7 мм. Найбільше пригнічення спостерігали на культурі *B. subtilis*. Фітотоксичність системи була оцінена на корінцях цибулі *Allium* сера, причому найвищі її прояви були зафіксовані в концентрації 500 ррт. Показники цитотоксичності за аналізу мітотичного індексу знижувались від 65% (контроль – дистильована вода) до 35 % в наносистемі золота за розведення до 500 ррт.

Ключові слова: наночастинок золота, «зелений» синтез, низькотемпературні евтектичні розчинники, пролін, екстракт вижимки винограду, антибактеріальні властивості, фітотоксичність.

Постановка проблеми. В останні роки нанотехнології були темою інтенсивних досліджень і посиленого інтересу серед дослідників. Виробництво та використання наночастинок різко розширилося в результаті швидкого розвитку нанотехнологій. Наночастинки золота (AuNP) – це унікальний матеріал, який може застосовуватись у багатьох галузях, в тому числі медицині. Вони є очевидним вибором для біомедичних застосувань завдяки функціональності та легкості синтезу. AuNP є перспективними для діагностичного та терапевтичного використання, включаючи біосенсори та здатність націлюватися на ракову пухлину з точною доставкою ліків нанотранспортними засобами до хворих тканин (таргетна протиракова терапія) [1–4]. Класичні методи синтезу наносистем золота передбачають використання наступних речовин-відновників: тетрагідроборат натрію, гідразин, фосфор та дихлорид олова. Ці хімічні сполуки часто використовують для отримання наноформ металів, що передбачає необхідність введення стабілізаторів – полівінілпіролідону, поліетиленгліколю та цетилтриметиламоній броміду. Однак, подальше використання таких систем у косметичній галузі або медицині обмежене, оскільки вони містять шкідливі речовини, які залишаються у колоїдному розчині після синтезу. Тому розробка нових способів одержання AuNP із залученням «зелених» реагентів є актуальною задачею.

Аналіз останніх досліджень та публікацій. Одним із «зелених» методів синтезу наночастинок є використання рослинних екстрактів, як джерело органічних сполук, які здатні відновити солі металів з утворенням наноформ. Цей спосіб доволі активно розглядається та в наукових публікаціях [5–8]. Навіть для «зеленого» синтезу металічних, металооксидних наноматеріалів, дослідники продовжують використовувати «традиційні» метанольні, ацетонові, толуолові, ефірні рослинні екстракти, що суттєво обмежує та галузі їх подальшого використання. На сьогоднішній день замало модернізувати технології синтезу, потрібно застосувати альтернативні, біосумісні та ефективні «зелені» розчинники/реакційні середовища з подальшим їх вивченням і удосконаленням. Таким чином, привабливими є низькотемпературні евтектичні розчинники (НЕР), що відповідають принципам зеленої хімії. Водночас збільшується і кількість досліджень екстракції рослинної сировини глибоко евтектичними розчинниками, які є новим типом іонних рідин, що містять сполуки які виступають доно-

ром та акцептором водневих зв'язків і утворюють розчини з надзвичайно низькими точками плавлення. Такі розчинники мають низку переваг – легкість приготування, хімічна інертність, низька ціна, більшість із них біологічно розкладаються і мають невисоку токсичність. НЕР в'язкі, тому екстракти на їх основі не лише відновлюють іони металів, а й додатково стабілізують утворену колоїдну систему [9–10]. Дослідження показують, що змінюючи кількість води у такому розчиннику, можна отримати наночастинки різної форми, що може призвести до прогресу синтезу і набутих властивостей [11]. Незважаючи на всі переваги НЕР, публікацій щодо їх використання в синтезі нанозолота доволі мало.

Метою роботи є розробка способу одержання колоїдних розчинів наночастинок золота з використанням екстракту рослинної сировини отриманого низькотемпературним евтектичним розчинником, вивчення їх фізико-хімічних характеристик, функціональних властивостей, антибактеріальної дії, фіто та цитотоксичності.

Виклад основного матеріалу.

Методика експериментальних досліджень

Для синтезу НЕР були використані дві хімічні сполуки, які мають наступну дію: одна – акцептор, а друга – донор водневого зв'язку. Низькотемпературний евтектичний розчинник приготували наступним чином. Молочну кислоту та пролін зважували, щоб досягти молярного співвідношення 2:1, і змішували в колбі на 200 мл. НЕР синтезували нагріванням на водяній бані за 60°C. Отриману НЕР використовували як екстрагент для екстракції органічних сполук із виноградних вичавок із подальшим використанням у синтезі без додаткового очищення. Для приготування екстракту порошок з виноградних вижимок додавали в НЕР у співвідношенні розчинник-тверда речовина 10:1, яке було підібране і відпрацьоване експериментально. Суміш поміщали в ультразвукову ванну зі вхідною потужністю 40 Вт і частотою 30 кГц. Параметри екстракції: температура 65°C, тривалість 60 хв. Потім екстракт декантували і фільтрували через паперовий фільтр.

Для синтезу нанозолота еквівалентні об'єми екстракту та 0,01 М HAuCl_4 окремо нагрівали у скляних стаканах на водяній бані до температури 50°C. Потім екстракт додали до HAuCl_4 і залишили на водяній бані на 45 хв. Біосинтезовані AuNP ідентифікувались за допомогою спектроскопічного дослідження. Для вимірювання UV-Vis використовували спектрофотометр Hitachi U-2900. Морфологію поверхні підготов-

лених AuNP оцінили за допомогою скануючої електронної мікроскопії (SEM). Для цього краплю колоїдної системи наносили на мідну пластину з вуглецевим покриттям і знімали при напрузі прискорення 10 кВ (CamScan з рентгєнівською приставкою для мікроаналізу енергії INCA-200).

Оцінку антибактеріальних властивостей проводили дисково-дифузійним методом на поживному агарі в чашках Петрі. За добу до випробування одержали інокулят: добові культури бактерій на мясо-пептонному бульйоні. Перед посівом густину інокуляту доводили до показника 0,5 за шкалою МакФарланда шляхом розведення поживним середовищем та стерильним фізіологічним розчином. В якості тест-культур були виробувані наступні мікроорганізми: *Escherichia coli* УКМ В-906 (грамнегативна паличкоподібна бактерія), *Bacillus subtilis* УКМ В-5006Т (грампозитивна спороутворююча паличкоподібна бактерія), *Candida albicans* D-6 (патогенний дріжджеподібний грибок). В чашки Петрі в стерильних умовах вносили по 15–20 г поживного агару. Після застигання агару щільно засівали його поверхню інокулятом методом широкого штриха за допомогою стерильного свабу. Попередньо простерилізовані диски з фільтрувального паперу, діаметром 5 мм занурили в розчин наносистеми на кілька секунд. Після цього диски розклали на поверхню вже інокульованого агару в кількості 5–6 шт на одну чашку Петрі. Чашки культивували в термостаті за температури 37°C. Огляд проводили через 1 та 5 діб культивування із заміром і описом зон інгібування росту мікроорганізмів у вигляді прозорих концентричних кол або просвітлених розводів навколо дисків. Тест на фітотоксичність був проведений на корінцях цибулі. Для досліду були відібрані цибулини *Allium cepa* без пошкоджень шкідниками та бактеріальними чи грибковими хворобами. Цибулини росли в пластикових склянках, наповнених розчинами дослідженої системи золота, впродовж 6 діб. В якості контролю була використана дистильована вода. Для оцінки повної біологічної дії наносистеми рекомендовано проводити визначення її потенційної цитотоксичності та генотоксичності. В якості критерію використовують мітотичний індекс, який є показником активності ділення соматичних клітин для оцінки швидкості росту та розмноження [12, 13]. За використання стандартного *Allium* тесту на клітинах меристеми корінців цибулі було випробувано одержану наносистему золота в концентраціях 5 ppm, 50 ppm та 500 ppm

Отримані експериментальні результати.

Утворення колоїдного розчину наночастинок

золота було підтверджено за допомогою спектрофотометричних методів (рис. 1). Частота абсорбції, яка відповідає плазмонному резонансу наночастинок золота, залежить від розміру, морфології та концентрації наночастинок у розчині. Зазвичай пік спостерігається в діапазоні від 500 до 600 нм, що відповідає видимій частині спектру. Зображений на рисунку пік УФ-спектру плазмонного резонансу колоїдного розчину наночастинок золота за $\lambda = 570$ нм свідчить про формування кластерів золота різної структури.

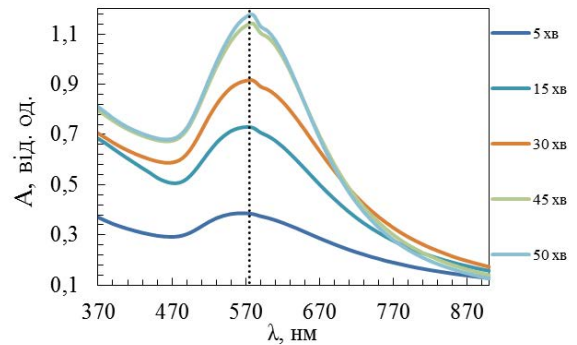


Рис. 1. Результати УФ-спектрофотометрії, які підтверджують утворення колоїдної системи золота після 45 хв.

Морфологічна характеристика наночастинок. SEM-аналіз (рис. 2) показав утворення наночастинок переважно сферичної, місцями трикутної (нанополігони) форм та дозволив виміряти їх розмір. Розбіг розмірів частинок для одержаної системи знаходиться у межах від 6,5 до 7,6 нм, при чому середній становить 7,2–7,6 нм. Наночастинкам саме сферичної форми (які суттєво переважають в нашій системі) властиві потенційні антимікробні та каталітичні властивості. Наночастишки золота однорідно дисперговані, відсутня явно виражена агломерація, що свідчить про стабільність отриманої системи.

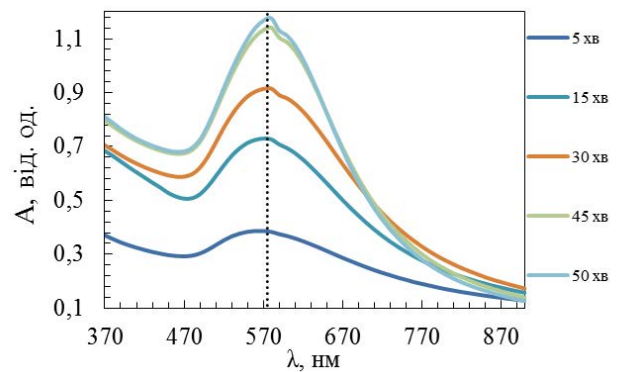


Рис. 2. SEM-зображення наночастинок золота, синтезованих з використанням екстракту вичавок винограду, отриманого НЕР на основі проліну та молочної кислоти

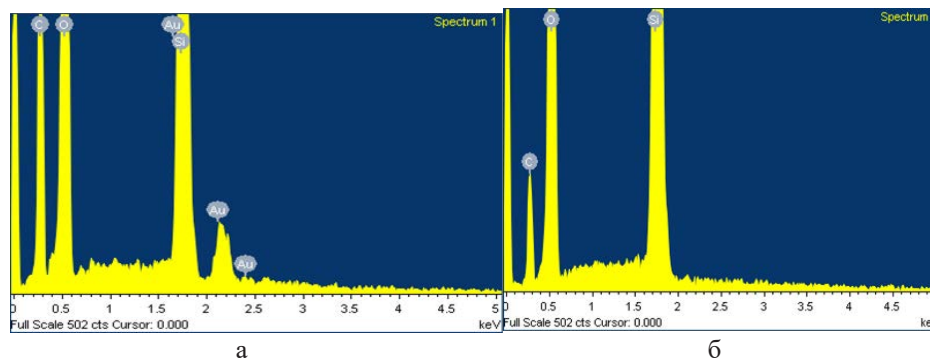


Рис. 3. EDAX-профіль синтезованих наночастинок золота (а) та екстракту вижимок винограду (б)

Елементний склад синтезованих AuNP, отриманий зі спектру енергодисперсійної спектроскопії на рис. 2 (а), демонструє три основні піки в межах 1,7–2,4 keV. Це підтвердило наявність синтезованих наночастинок золота. Для порівняння був також знятий аналіз чистого екстракту (рис. 2 (б)), де відповідно пік золота відсутній. Крім того, також були виявлені сигнали карбону та кисню, що підтверджує присутність органічних сполук, які виступають стабілізаторами системи. Наявність сигналу силіцію пов'язана з покриттям пластинки кремнієм відповідно до стандартної методики підготовки зразку до електронно-скануючого мікроскопіювання.

Інфрачервона спектроскопія з перетворенням Фур'є (FTIR). Методом інфрачервоної спектроскопії встановлено функціональні групи органічних природних сполук, що присутні в екстракті вижимок винограду та беруть участь у синтезі наночастинок золота. Для ІЧ-спектру екстракту (рис. 4 крива 1) притаманні піки поглинання при 895 cm^{-1} , 980 cm^{-1} , 1126 cm^{-1} , 1333 cm^{-1} , 1474 cm^{-1} , 3357 cm^{-1} , які відповідають -C-H, -CH=CH-, -C-O-, -C=C- (ароматичні), -ОН функціональним групам. Зникнення деяких піків (рис. 4 крива 2) і зміна довжини хвилі поглинання функціональних груп при дослідженні зразка дисперсної системи вказує на те, що екстракт вижимок винограду містить вторинні метаболіти, які діють як відновлюючі і стабілізуючі агенти для синтезу AuNP.

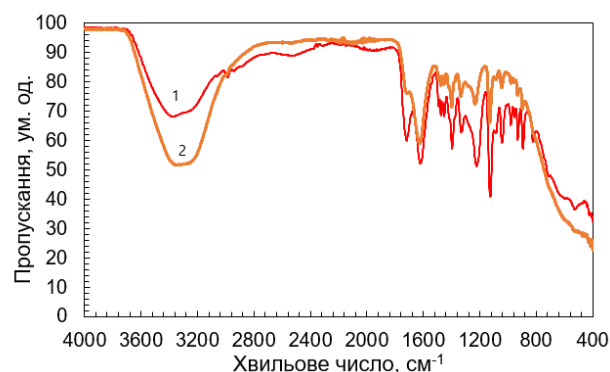


Рис. 4. ІЧ-спектри екстракту вижимки винограду (1) та синтезованих наночастинок золота (2)

Яскраво помітна зміна інтенсивності поглинання за 3357 cm^{-1} вказує на те, що частина гідроксильних груп -ОН бере участь у відновленні та стабілізації наночастинок золота.

Антибактеріальні властивості наночастинок золота. Одержані розчини наночастинок золота, стабілізованих НЕР, виявляють дезінфекційні (антимікробні) властивості щодо грам негативної палички *Escherichia coli*, грам позитивної спороутворюючої палички *Bacillus subtilis* та патогенного дріжджового грибка *Candida albicans*. (рис. 5) Наносистема показала інгібуючу дію на усі три культури, за рахунок чітко виражених зон інгібування розміром від

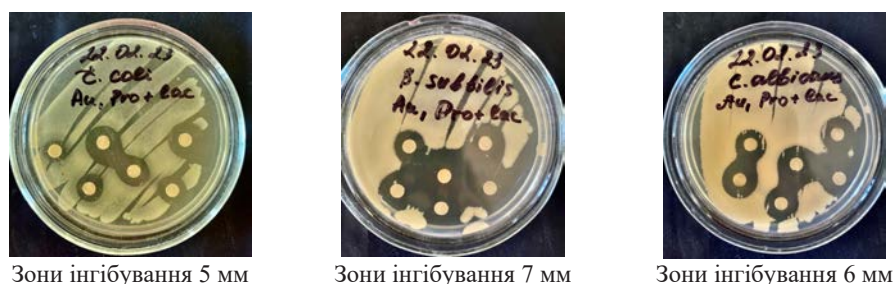


Рис. 5. Оцінка антибактеріальної властивості наносистеми золота на поживному агарі дисково-дифузійним методом

Оцінка фітотоксичності наносистеми золота за кількістю і довжиною корінців

Параметри для оцінки фітотоксичності	контроль	Наносистема золота		
		5 ppm	50 ppm	500 ppm
Середня довжина корінців	5.6	2	1.5	0,9
Індекс фіто токсичності, %		64	73	84
		висока	висока	надзвичайно висока
Індекс Кабірова (фіто токсичність за шкалою Кабірова)		0,36	0,27	0,15
		висока	висока	висока

4 до 7 мм. Найсильніше пригнічення росту спостерігали на культурі *B. subtilis*.

Проведений у власній модифікації методики Allim test показав, що отримана система нанозолота інгібувала ріст корінців, проявляючи ефекти високої фітотоксичності. Найгірший ріст корінців спостерігали за концентрації 500 ppm (таблиця 1).

Розраховані показники мітотичного індексу демонструють прояв цитотоксичності в усіх досліджених концентраціях AuNP. Якщо в контролі МІ становив 65%, то в наносистемі зі зростанням концентрації спостерігали суттєве його зниження: 5 ppm – 49.6%, 50 ppm – 36,3%, 500 ppm – 34.5%. Одержані дані демонструють суттєве зниження активності поділу і росту клітин меристеми коренів цибулі.

Висновки. Використовуючи пролін та молочну кислоту було синтезовано низькотемпературний евтектичний розчинник, за допомогою якого отри-

mano екстракт з вичавок винограду. Використання низькотемпературного евтектичного розчинника мало подвійну дію. По-перше, він виступав як екстрагент та забезпечував багатокомпонентність складу рослинного екстракту. По-друге, був одержаний екстракт високої в'язкості значно уповільнював седиментацію частинок, покращуючи стабільність системи. Використовуючи «зелений» спосіб було одержано колоїдний розчин золота із середнім розміром частинок 7,2–7,5 нм. Нанодисперсність системи було підтверджено УФ-спектроскопією, а саме зафіксовано характерний для наночастинок золота пік поглинання при довжині хвилі 500–600 нм.

Отримана наносистема мала широкий спектр антибактеріальної дії, і ефективно пригнічувала ріст бактерій *Escherichia coli*, *Bacillus subtilis* та дріжджового грибка *Candida albicans*. Наносистема в концентраціях вище 5 ppm продемонструвала високу фіто- та цитотоксичність

Список літератури:

1. Fan M., Han Y., Gao S., Yan H., Cao L., Li Z., Liang X.J., Zhang J. Ultrasmall gold nanoparticles in cancer diagnosis and therapy. *Theranostics*. 2020. 10 (11) P. 4944–4957. doi:10.7150/thno.42471. <https://www.thno.org/v10p4944.htm>
2. Zhang J., Mou L., Jiang X. Surface chemistry of gold nanoparticles for health-related applications. *Chemical Science*. 2020. 11 (4). P. 923–936. <https://pubs.rsc.org/en/content/articlepdf/2020/sc/c9sc06497d>
3. Hammami I., Alabdallah N. M.mGold nanoparticles: Synthesis properties and applications. *Journal of king Saud university-science*. 2021. 33 (7). 101560. <https://doi.org/10.1016/j.jksus.2021.101560>
4. Sathiyaraj S. ., Suriyakala G., Gandhi A., Babujanathanam R., Almaary K., Chen T. W., Kaviyarasu K. Biosynthesis, characterization, and antibacterial activity of gold nanoparticles. *Journal of Infection and Public Health*. 2021. 14 (12). P. 1842–1847. <https://doi.org/10.1016/j.jiph.2021.10.007>
5. Bharadwaj K. K., Rabha B., Pati S., Sarkar T., Choudhury B. K., Barman, A., Mohd Noor N. H. Green synthesis of gold nanoparticles using plant extracts as beneficial prospect for cancer theranostics. *Molecules*. 2021. 26 (21). 6389. <https://doi.org/10.3390/molecules26216389>
6. Al-Radadi N. S. Facile one-step green synthesis of gold nanoparticles (AuNp) using licorice root extract: Antimicrobial and anticancer study against HepG2 cell line. *Arabian Journal of Chemistry*. 2021. 14 (2). 102956. <https://doi.org/10.1016/j.arabjc.2020.102956>
7. Akintelu S. A., Yao B., Folorunso A. S. Green synthesis, characterization, and antibacterial investigation of synthesized gold nanoparticles (AuNPs) from *Garcinia kola* pulp extract. *Plasmonics*. 2021.16. P. 157–165. <https://link.springer.com/article/10.1007/s11468-020-01274-9>
8. Perveen K., Husain F. M., Qais F. A., Khan A., Razak S., Afsar T., Abulmeaty M. M. Microwave-assisted rapid green synthesis of gold nanoparticles using seed extract of *Trachyspermum ammi*: ROS mediated biofilm inhibition and anticancer activity. *Biomolecules*. 2021. 11 (2). 197. <https://doi.org/10.3390/biom11020197>
9. Ling J. K. U., and Hadinoto K. Deep eutectic solvent as green solvent in extraction of biological macromolecules: A review. *International Journal of Molecular Sciences*. 2022. 23 (6). 3381. <https://doi.org/10.3390/ijms23063381>

10. Rashid R., Wani S. M., Manzoor S., Masoodi F. A., Dar M. M. Green extraction of bioactive compounds from apple pomace by ultrasound assisted natural deep eutectic solvent extraction: Optimisation, comparison and bioactivity. *Food Chemistry*. 2023. 398. 133871. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2022.133871>
11. Das N., Kumar A., Rayavarapu R. G. The role of deep eutectic solvents and carrageenan in synthesizing biocompatible anisotropic metal nanoparticles. *Beilstein Journal of Nanotechnology*. 2021. 12(1). P. 924–938. <https://doi.org/10.3762/bjnano.12.69>
12. Rajeshwari A., Suresh S., Chandrasekaran N., Mukherjee A., Toxicity evaluation of gold nanoparticles using an *Allium cepa* bioassay. *RSC Advances*. 2016, 6, 29: 24000–24009. <http://dx.doi.org/10.1039/C6RA04712B>
13. Scherer M. D., Sposito J. C., Falco W. F., Grisolia A. B., Andrade L. H., Lima S. M., Caires A. R. Cytotoxic and genotoxic effects of silver nanoparticles on meristematic cells of *Allium cepa* roots: A close analysis of particle size dependence. *Science of The Total Environment*. 2019. 660 P. 459–467, <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.12.444>

Vorobiova V.I., Khrokalo L.A., Vinnichuk E.V., Kravchenko F.E., Fedulova V.S., Vasyliiev H.S., Skyba M.I. SYNTHESIS OF GOLD NANOPARTICLES USING EXTRACT OF GRAPE PROCESSING WASTE BASED ON LOW-TEMPERATURE EUTECTIC SOLVENT, THEIR ANTIBACTERIAL PROPERTIES AND TOXICITY

The new method of gold nanoparticles synthesis using grape pomace extract obtained with a low-temperature eutectic solvent as a mixture of proline and lactic acid in a molar ratio of 1:2 is presented. This method is become environmentally safe because hasn't involved toxic reagents. The nanoparticles creation and their properties evaluation were carried out using scanning electron microscopy, spectroscopic elemental analysis, Fourier transform infrared spectroscopy, and ultraviolet spectroscopy. It was established that the size of nanoparticles varies within 6,5–9,1 nm, with an average of 7,4 nm. Surface plasmon resonance is observed in the UV spectrum that confirms the presence of nanoparticles. Using the method of infrared spectroscopy, the functional groups of organic natural compounds present in the grape pomace extract and involved in the synthesis of gold nanoparticles were established. Absorption intensity decreasing in the range of 1600–1400 cm⁻¹ indicates the involvement of hydroxyl functional groups in the nanosystems stabilization.

*Antibacterial properties of the nanosystem were studied using the disk diffusion method on nutrient agar on test cultures, such as: gram-negative bacteria *Escherichia coli*, gram-positive spore-forming bacteria *Bacillus subtilis*, and pathogenic yeast *Candida albicans*. The system demonstrated a depressive effect on all microorganisms, with clearly defined inhibition zones ranging in size from 4 to 7 mm. The strongest inhibition was observed on *B. subtilis*. Phytotoxicity of the system was evaluated on *Allium cepa* roots, and its highest expression was recorded at a concentration of 500 ppm. The cytotoxicity indicators, as analyzed by the mitotic index, decreased from 65% (control – distilled water) to 35% in the AuNPs at a dilution of up to 500 ppm.*

Key words: gold nanoparticles, “green” synthesis, low-temperature eutectic solvents, proline, grape pomace extract, antibacterial properties, phytotoxicity.

Drobyazko A.A.

National Technical University of Ukraine “Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute”

Linyucheva O.V.

National Technical University of Ukraine “Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute”

Byk M.V.

National Technical University of Ukraine “Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute”

OBTAINING AND STUDY AN OPTICAL PROPERTIES OF BLACK COATINGS ON ALUMINUM ALLOYS

The article is devoted to the study of deposition processes of optically black coatings on aluminum parts. Such coatings are indispensable at analog optical systems designing for receiving and transmitting images. Unlike digital optical systems, analog ones are more resistant to radio interference. To transmit an image in such systems, reflection between two or more mirrors is used. The main characteristic of the mirror layer is the reflectivity, but it reflects not only the desired part of the radiation, but also the interfering radiation. To avoid image distortion, the internal and external non-reflective parts in such systems must have an optical black coating with high absorption of radiation in the visible part of the spectrum.

The article reveals the peculiarities of surface preparation of aluminum parts for obtaining optical black coatings. Since for military applications, devices based on aluminum alloys are increasingly used, combining strength and light weight, this is especially appreciated in field conditions.

It is known that aluminum and its alloys are characterized by a bright surface and the presence of a stable protective oxide film. Therefore, for the application of optical black coatings, it is proposed to use the process of anodizing aluminum with subsequent filling of the oxide film by adsorption or chemical methods or the use of intermediate metal coatings with an external optical black nickel coating.

The article provides a comprehensive analysis of the obtained black optical coatings on the aluminum surface. The main goal of the article is to compare the two obtained coatings with respect to the light absorption coefficient and corrosion resistance. The paper presents the results for various methods of preparation and application of coatings on the aluminum surface.

It was found that direct porous aluminum anodization followed by painting with an organic dye has poor resistance to UV-radiation and changes color after two weeks. It is shown that the coloring of the porous anodized layer by the electrochemical method shows better resistance to UV-radiation, but poor corrosion resistance.

A multilayer coating containing chemically and electrochemically applied nickel coatings with a top layer of black nickel coating has been found to have the best protective and optical properties. An electrolyte for the electrochemical deposition of a protective nickel coating is proposed, which, due to the content of fluorine ions, provides a non-porous coating and strong adhesion of the coating to the base. In addition, due to heat treatment, the adhesion and corrosion resistance of the multilayer coating increases.

Key words: analogy optical systems, black optical coating, nickel coating, aluminum anodizing, UV-resistance, corrosion resistance.

Formulation of the problem. In order to obtain a non-distorted image in analog optical systems, an important condition is the absence of parasitic reflection from the body parts of the optical system. For this, the parts must be covered by a coating that absorbs all visible radiation and thus reduces image distortion. Black nickel is the blackest coating of all that can be obtained by electroplating. Black chrome, black rhodium, black ruthenium – all these coatings are dark gray in color. The true black finish is black nickel only. Black nickel coating is used to give

parts made of steel and non-ferrous metals special optical and decorative properties. Depending on the electrolyte composition and coating conditions, the coating on the product can be not only saturated black, but also dark brown, as well as blue-violet (with the use of an interference film). The thickness of the coating layer varies from 1 to 50 microns and depends on the metal to which it is applied, as well as on the requirements for the product. A rich and deep black color on the products is obtained if the current density is selected correctly. Black nickel plating is

used both to give details a decorative look, in jewelry, and in various branches of the optical and machine industry.

For military applications, devices based on aluminum alloys are increasingly used, combining strength and low weight, which is especially appreciated in field conditions. However, aluminum and its alloys are characterized by a shiny surface and the presence of a stable protective oxide film. To apply optical black coatings, you can use aluminum anodization with the filling of the oxide film by adsorption or chemical methods or using intermediate metal coatings with the application of the top optical black nickel coating.

Analysis of recent research and publications.

There are already many articles devoted to aluminum anodizing as protective and functional layer formation, in particular, with the creation of a black absorbent coating [1–5]. There are also many publications concerned to nickel and black nickel optical coatings on steel and non-ferrous bases. The direct application of galvanic coatings on the surface of aluminum and its alloys is complicated by the presence of a strong oxide layer on its surface, which prevents the production of coatings firmly attached to the base. Since the presented material is not sufficiently stable, the surface must be additionally protected before applying the black nickel optical coating.

As a coating, you can use galvanic metal coatings, as well as metallic and non-metallic coatings obtained by the method of vacuum spraying or thermal diffusion application. The simplest and most accessible is galvanic coatings.

In the case of using aluminum or its alloys as a base, the process of applying galvanic coatings is characterized by several features. They are due to the presence of a strong and easily recoverable oxide film on the surface of aluminum (due to the high activity of the metal to oxygen), which prevents good adhesion of the deposited metal to the base. In addition, contact release of copper, zinc, silver, nickel, tin, chromium and other more positive metals can occur on this metal, which can also impair adhesion of sediments to the base. Aluminum is significantly different from deposited metals in terms of thermal expansion coefficient, hydrogen overvoltage, and so on. Due to highlighted reasons at applying galvanic coatings to aluminum and its alloys, special preparation of the surface of the base is necessary, which would reduce the effect of the above factors. There are various methods of preparing the surface of aluminum before applying galvanic coatings: chemical, electrochemical and mechanical.

Three methods are used to apply galvanic coatings to aluminum and its alloys:

- contact (or zincate) method, in which the oxide film is removed before coating and replaced with a thin layer of contact deposited metal (most often zinc, cadmium, nickel and others);

- electrochemical method, by means of which the thickness of the oxide film is increased by anodizing in special solutions to obtain a highly porous layer, which ensures the strength of adhesion with the galvanic coating applied afterwards.

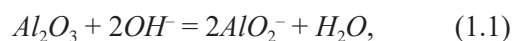
- galvanic method, by means of which galvanic coatings of electrolytes containing activators are applied to the surface of aluminum or its alloys. With this method, it is not necessary to apply special methods of pre-treatment of the surface of the parts.

Contact method.

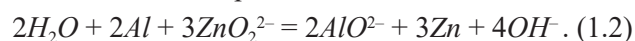
This method is used most often due to its simplicity, cheapness and versatility. Most of the coatings that are deposited on aluminum and its alloys are applied to an interlayer of contact-deposited zinc, which is why this method is often called "zinc".

Zinc deposition can be carried out from acidic or alkaline solutions, but in practice, alkaline solutions are more often used.

When processing in an alkaline zincate solution, the oxide film dissolves:



and contact zinc deposition:



Good adhesion of galvanic coatings to the zinc layer is achieved with thin and dense layers of zinc. The thickness of the zinc coating depends mainly on the concentration of caustic sodium in the solution: the higher it is, the thinner the deposit. To increase the density of the zinc layer, modifiers can be introduced into the zinc solution: ferrous salt (10...20 g/l), $FeCl_3$ (1...2 g/l) or $NaNO_2$ (1 g/l). The growth of the film in zincate solutions continues in the first 15 seconds, therefore the duration of treatment is not of great importance. For pure aluminum and its alloys with manganese, it is 10 s, for alloys with silicon – 5...10 s, for alloys with copper – 5 s.

Double treatment in a zincate solution is often practiced. To do this, the zinc film obtained during the first treatment is removed by etching in a 30–50% solution of nitric acid, and after thorough washing, it is treated again in a zincate solution. After the second application, the obtained layer of zinc is again removed in a solution of nitric acid. The mechanism of film adhesion improvement with two-time processing is not yet completely clear, but

such processing gives good results. It is possible to galvanically deposit a layer of other metals (Cu, Zn, Cd, Cr, Ag, Ni) on contact zinc (one-time treatment). Ordinary electrolytes are recommended for applying galvanic coatings on the zinc layer.

Electrochemical method.

Phosphoric acid electrolytes have become the most widely used for pre-anodizing aluminum alloys before applying galvanic coatings. The thickness and quality of the oxide film depend on the voltage on the electrolyzer, temperature, duration of treatment and acid concentration. The necessary degree of porosity is provided by concentrated solutions of phosphoric acid.

It is recommended to process only Al alloys in this way. Unsatisfactory adhesion of galvanic coatings to the base is observed on pure or technical aluminum after anodization in H_3PO_4 .

When the galvanic coating is deposited on the oxidized surface of aluminum, nuclei are formed at individual points of the cathode. Then the sediment forms "islands" on the surface to be covered, which gradually grow into a continuous coating. The first layers of metal when deposited on the oxide layer have a dark, even black color, regardless of whether copper, nickel or silver is deposited, and only as the coating builds up, it takes on a normal appearance. The most common processes of electrodeposition of metals on the oxide layer are nickel plating (sulphuric acid or sulfamate electrolyte) and copper plating (pyrophosphate electrolyte).

Galvanic method.

With this method, galvanic coatings are applied to parts made of aluminum and its alloys after the usual surface preparation (mechanical, chemical) from electrolytes with special additives – activators (F^- , $S_2O_8^{2-}$, $P_2O_7^{4-}$, NO_2^-).

When using aluminum alloys, one of the methods of leveling the effect of the oxide film and creating a continuous layer of metal coating is the deposition of contact nickel from a chloride-phosphate solution.

A powder nickel is deposited on top of the formed nickel contact film, which does not reduce adhesion, but increases the roughness of subsequent layers of galvanic coatings. With this method of protecting the surface of aluminum, there are no strict requirements for the preliminary preparation of aluminum parts. After applying the contact film, electrolytic coatings of metals and alloys are applied, as for the nickel sublayer. Heat treatment significantly improves the adhesion of the coating to the base. Methods of coating aluminum with preliminary anodic oxidation of the surface are used quite rarely and mainly for decorative coatings that are not subjected to mechanical and thermal loads after that.

Direct coating on aluminum is the simplest. At the same time, there are no operations for preliminary modification of the surface. Preliminary preparation of parts includes degreasing in an alkaline composition and etching in nitric acid.

The most attractive from the point of manufacturability, soldering ability, heat resistance and corrosion resistance is to obtain a nickel coating from an electrolyte with the following composition, g/l: $NiSO_4 \cdot 7 H_2O$ – 150...250, H_3BO_3 – 23...30, NaF – 1..3, NaCl – 1...3, $K_2S_2O_8$ – 1...3.

The temperature of electrodeposition is 50...60°C, cathodic current density – 1.0...2.0 A/dm², pH 4.0...4.4.

The parts are hung without current, and it is desirable to withstand 1-min. and then turn on the current.

To increase the covering capacity (details of a complex profile), it is suggested to add sodium sulfate 40–60 g/l or lithium sulfate 16–25 g/l to the electrolyte. The latter supplement is more effective. After applying such a coating, it is recommended to carry out heat treatment at 180–300°C for 0.5–2 hours [4, 5].

At the temperature of the electrolyte below 45 °C, there is a sharp deterioration of the adhesion strength. At elevated temperatures, persulfate self-decomposes, and nickel oxidizes to the trivalent state with the formation of a black precipitate of hydroxide. When using low current densities, parts may not be covered, and when high current densities are used, the coating may swell. Therefore, during the operation of such an electrolyte, it is necessary to control the pH and concentration of persulfate. If the technology involves heat treatment, then coatings capable of delaying hydrogen diffusion must be applied after this operation, otherwise heat treatment does not improve adhesion.

Any types of galvanic coatings can be used as surface coatings after applying a protective sublayer after preliminary activation of the applied and heat-treated nickel sublayer.

Task statement. The work aims to develop the influence of aluminum surface pretreatment and coating application regimes on the optical and corrosion properties of obtained black absorbent coating.

Presentation of the main material

Materials and methods of research. All chemical was used of p.a. grades. As a base for all investigations the 6061 aluminum alloy was used. Research was conducted on aluminum alloy parts to create a black surface for parts of the military optical system.

For this, the parts were subjected to preliminary treatment, which included degreasing, etching, application of chemical nickel coating, application

of galvanic nickel coating, heat treatment and application of black optical nickel coating.

When producing samples with a single-layer coating, a layer of nickel was applied directly to the prepared surface of aluminum samples. Preliminary preparation included degreasing with an alkaline solution and etching in a dilute hydrochloric acid solution to etch the oxide film.

For degreasing, the ready-made degreasing composition Ecasit BTU 40 of the company Metalchemie Ukraine was used. The concentration of the composition for degreasing is 50 g/l, the degreasing temperature is 50–60°C, and the operation time is 5–10 minutes. Since the composition of degreasing includes alkaline components and surfactants, to clean the surface of the part, warm washing in water at a temperature of 50–60°C for 1–2 minutes was carried out, followed by cold washing for 1–2 minutes. Water purified by reverse osmosis was used to prepare electrolyte solutions and wash parts between operations.

After degreasing, the oxide film was etched in hydrochloric acid with a concentration of 5% wt. for 20–50 seconds and rinsing in cold water for 1–2 minutes.

To create a protective film tightly bonded to the surface of the aluminum alloy, chemical nickel plating was used in a solution with the following composition, g/l: $\text{NiSO}_4 \cdot 7 \text{H}_2\text{O} - 25 \dots 50$, $\text{H}_3\text{PO}_4 - 230 \dots 300$.

The temperature of the chemical nickel sub-layer deposition was 80–85°C, the deposition time 3–5 minutes.

After that, a protective nickel coating was applied to the parts from an electrolyte with the following composition, g/l: $\text{NiSO}_4 \cdot 7 \text{H}_2\text{O} - 150 \dots 250$, $\text{H}_3\text{BO}_3 - 23 \dots 30$, $\text{NaF} - 1 \dots 3$, $\text{NaCl} - 1 \dots 3$, $\text{K}_2\text{S}_2\text{O}_8 - 1 \dots 3$.

The temperature of the electrolyte was 50...60°C, the cathode current density was 1.0...2.0 A/dm², pH 4.0...4.4. The parts were suspended without current and kept for 2 min., and then the calculated current was turned on.

To strengthen the adhesion of the nickel sublayer to the base, after applying the main protective nickel coating, the obtained samples were heat treated in a drying cabinet at a temperature of 220°C for 2 hours.

After that, a black nickel plating was applied to the areas that should have a black non-reflective surface.

Electrolyte with the following composition, g/l, was used for black nickel plating: $\text{NiSO}_4 \cdot 7 \text{H}_2\text{O} - 150 \dots 250$, $\text{ZnCl}_2 - 15-25$, additive Black Nickel 30 ml, additive Netzmittel N3 10 ml.

The black nickel coating was deposited on the surface of the nickel coating previously activated in

a hydrochloric acid solution at a current density of 0.2 A/dm².

To compare the corrosion resistance and optical properties of black coatings, a black coating was also obtained on an anodized aluminum alloy.

Surfaclean 990 Metalchemie Ukraine degreaser was used to degrease the aluminum alloy before anodizing. The concentration is 50 g/l, the degreasing temperature is 60 °C, and the duration of the operation is 5–10 minutes.

After that, the parts were rinsed in warm (60°C) and then in cold deionized water for 1–2 minutes.

The etching was carried out with Activator DO45 (50 g/l) at a temperature of 25°C for 3–5 minutes. After that, it was rinsed in deionized water at room temperature for 1–2 minutes, and anodization was carried out in a sulfuric acid solution of 200 g/l at an anodic current density of 1 A/dm² for 30 minutes.

After rinsing in deionized water for 1–2 minutes, electrochemical coloring was carried out in a solution of the following composition, g/l: $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O} - 35$, $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O} - 20$, $\text{H}_2\text{SO}_4 - 5$. Electrochemical coloring was carried out on alternating current at a voltage of 10 V for 3–5 min, after which 15 min at a voltage of 15 V.

After rinsing in deionized water for 2 min, the pores of the oxide film on the aluminum alloy were closed in hot (95°C) deionized water for 30 min.

For comparison, part of the anodized samples was coloring by adsorption dyeing in a solution of aniline black dye (5 g/l) at a temperature of 80 °C for 15 min, followed by closing the pores in hot water, as in the case of electrochemical coloring of the anodic film.

An experimental stand was developed to experimentally determine the degree of blackness. The basis of the design is a sample in the form of a strip of material 10*100 mm installed in a horizontal position on tripod 4 (Fig. 1). A coating with a known degree of blackness (1) was applied to one half of the sample (soot was used), and a coating whose degree of blackness was to be determined was applied to the other half.

A heating element is installed from below, which is connected to the power source 3. The power source allows setting different values of current and voltage on the heater, thus providing different values of temperatures on the surface of the sample in the desired range.

The temperature of the test sample is measured by thermocouples 5 and a thermal imager 9. The thermocouples are connected to the cold junction block and then through the switch 7 to the voltmeter 8. The thermal imager is installed at some distance from the sample, and the radiation temperatures of surfaces 1 and 2 are measured.

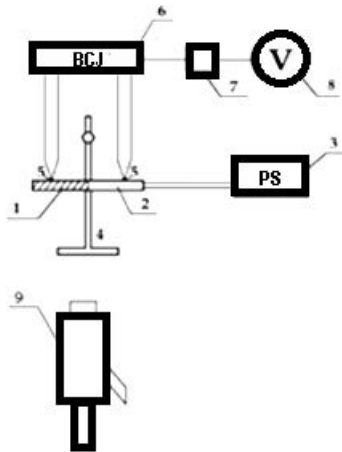


Fig. 1. Scheme of the installation for determining the blackness of samples: 1 – surface with a known degree of blackness, 2 – investigated surface, 3 – power source (PS), 4 – tripod, 5 – thermocouples, 6 – block of cold junctions (BCJ), 7 – switch, 8 – millivoltmeter, 9 – thermal imager

Research results indicate that the degree of blackness of nickel-plated samples is 0.94–0.95, and the degree of blackness of anodized aluminum samples is 0.89–0.92.

The corrosion resistance of the obtained samples was checked in a heat and moisture chamber at a temperature of 30 °C and a humidity of 90% for 7 days. The nickel-coated samples did not undergo significant changes, while the anodized aluminum samples showed white spots due to aluminum corrosion.

Conclusions. The possibility of obtaining an optical black coatings on aluminum alloys by the methods of applying a black nickel coating and aluminum anodizing with electrochemical coloring of the film has been established.

High degrees of blackness of the obtained films and high corrosion resistance of optical nickel coatings on aluminum alloy parts was established.

Bibliography:

1. Guofeng Cui, Ning Li, Deyu Li, Jian Zheng, Qinglong Wu The physical and electrochemical properties of electroless deposited nickel–phosphorus black coatings // *Surface & Coatings Technology* 200 (2006), P. 6808–6814.
2. A.R. Shashikala, A.K. Sharma, D.R. Bhandari Solar selective black nickel–cobalt coatings on aluminum alloys // *Solar Energy Materials and Solar Cells.* – Volume 91, Issue 7, 16 April 2007, P. 629-635.
3. R.M. Khalifaa, E.A. Al Hameda, M.A. Shoeibb, H.A. Mohameda, S.Y. Ahmeda Characterization of black nickel coatings on aluminium substrate // *Global Journal of Pure and Applied Chemistry Research* Vol. 3, No.2, P. 1-13, June 2015.
4. Anand Kumar Sharma, H. Bhojaraj Gold and black nickel plating on stainless steel for space applications June 1990 *Metal Finishing* 88(6). P. 115-116.
5. Amorphous and Nano Alloys Electroless Depositions Technology, Composition, Structure and Theory By Bangwei Zhang 2015, 776 P.

Дробязко А.А., Лінючева О.В., Бик М.В. ОТРИМАННЯ ТА ДОСЛІДЖЕННЯ ВЛАСТИВОСТЕЙ ОПТИЧНИХ ЧОРНИХ ПОКРИТТІВ НА АЛЮМІНІЄВИХ СПЛАВАХ

Стаття присвячена вивченню процесів осадження оптично чорних покриттів на алюмінієвих деталях. Такі покриття є незамінними при створенні аналогових оптичних систем одержання та передачі зображення. На відміну від цифрових оптичних систем, аналогові є більш стійкими до радіоперешкод. Для передачі зображення у таких системах використовується відображення між двома і більше дзеркалами. Основною характеристикою дзеркального шару є відбивна здатність, але він відбиває не тільки бажану частину випромінювання, але й заважає випромінювання. Щоб уникнути спотворення зображення, внутрішня і зовнішня невідбиваючі частини у таких системах повинні мати оптичне чорне покриття з високим поглинанням випромінювання у видимій частині спектру.

У статті розкрито особливості підготовки поверхні алюмінієвих деталей для одержання оптичних чорних покриттів. Так як для військових застосувань все частіше використовуються пристрої на основі алюмінієвих сплавів, що поєднують міцність і малу вагу, що особливо цінується в польових умовах.

Відомо, що алюміній і його сплави характеризуються світлою поверхнею і наявністю стійкої захисної оксидної плівки. Тому для нанесення оптичних чорних покриттів запропоновано використовувати процес анодування алюмінію із подальшим наповненням оксидної плівки адсорбційними або хімічними методами або використання проміжних металевих покриттів із зовнішнім оптичним чорним нікелевим покриттям.

У статті проведено комплексний аналіз отриманих чорних оптичних покриттів на поверхні алюмінію. Основною метою статті є порівняння двох одержаних покриттів щодо коефіцієнту світлопоглинання та стійкості до корозії. В роботі наведено результати для різних методів підготовки та нанесення покриттів на поверхню алюмінію.

З'ясовано, що пряме пористе анодування алюмінію з подальшим фарбуванням органічним барвником має погану стійкість до ультрафіолетового випромінювання і змінює колір через два тижні. Показано, що забарвлення пористого анодованого шару електрохімічним методом демонструє кращу стійкість до УФ-випромінювання, але погану стійкість до корозії.

Встановлено, що найкращі захисні та оптичні властивості має багатошарове покриття, що містить хімічно та електрохімічно нанесені нікелеві покриття, із верхнім шаром чорного нікелевого покриття. Запропоновано електроліт для електрохімічного осадження захисного нікелевого покриття, який завдяки вмісту іонів фтору забезпечує безпористе покриття і міцне зчеплення покриття з основою. Крім того, за рахунок термообробки підвищується адгезія і стійкість до корозії багатошарового покриття.

Ключові слова: аналогові оптичні системи, чорне оптичне покриття, нікелеве покриття, анодування алюмінію, стійкість до ультрафіолету, корозійна стійкість.

Майзеліс А.О.

Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут»

**КОРОЗИЙНІ ВЛАСТИВОСТІ МУЛЬТИШАРОВИХ ПОКРИТТІВ
[(CU-ZN)_{БАЗ}/(CU-ZN)_{ДОД}]_N**

Рівень корозійної стійкості покриттів сплавом мідь-цинк важливий не тільки у разі їх використання як захисних, але й в разі використання як декоративних і функціональних. Стаття присвячена порівняльному аналізу корозійних властивостей мультишарових покриттів, які складаються з шарів сплаву мідь-цинк різного складу нанорозмірної товщини, що електроосажені з пірофосфатно-цитратного електроліту, з властивостями одношарових покриттів цим сплавом з метою оптимізації їх архітектури. Об'єкт досліджень – параметри корозії в розчині натрію хлориду одношарових покриттів (Cu-Zn)_{баз} базового складу і мультишарових покриттів [(Cu-Zn)_{баз}/(Cu-Zn)_{дод}]_n, в яких базові шари чергуються з додатковими шляхом використання при осадженні двоімпульсного гальваностатичного методу. Параметри визначено поляризаційним методом за допомогою потенціостату Р-45Х. Виявлено, що з часом електроосадження осад сплаву збагачується більш електронегативним цинком, потенціал його корозії зсувається у бік негативних значень і струм корозії збільшується. Зміна співвідношення концентрацій іонів металів в електроліті на користь міді супроводжується зсувом стаціонарного потенціалу сталевого зразка з покриттям сплавом в розчині натрію хлориду в бік більш позитивних значень, більшою поляризацією анодного процесу поблизу стаціонарного потенціалу з відповідним зменшенням струму корозії. При використанні перемішування при осадженні мультишарових покриттів потенціал їх корозії в розчині хлориду натрію зсувається у бік більш позитивних значень, але покриття залишаються анодними по відношенню до вуглецевої сталі, і струм корозії знижується у 2–2,5 рази. Показано, що мультишарові покриття, отримані з пірофосфатно-цитратного електроліту двоімпульсним гальваностатичним методом, більш корозійно стійкі в порівнянні з отриманими в інших умовах покриттями на основі сплаву мідь-цинк різного складу, як катодними, так й анодними по відношенню до вуглецевої сталі.

Ключові слова: мідь, цинк, латунь, мультишарові покриття, корозійні властивості, пірофосфатно-цитратний електроліт.

Постановка проблеми. В залежності від складу сплаву Cu-Zn, покриття з цього сплаву, відомі як декоративні [1, 2], захисні та функціональні: покриття використовують як самостійне, для захисту сталі від агресивних середовищ [3], так й як підшар, для сприяння підвищенню зчеплення гуми зі сталевими шинами [1], перед осадженням металевих, керамічних або пластикових покриттів [4]. Крім того, використовують їх електрокаталітичну активність [5], пам'ять форми [3, 6–8].

Практично у всіх сферах застосування покриттів сплавом важливі їх корозійні властивості. Оскільки складові сплаву значно різняться за стандартними потенціалами, в залежності від вмісту цих металів в сплаві та фазового складу сплаву покриття може захищати сталеву основу як катодно, так й анодно. У першому випадку важлива корозійна стійкість власно покриття, у другому – ще його поруватість.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Окрім отруйних ціанідних електролітів [1], для електроосадження покриттів сплавом Cu-Zn най-

більше використовуються пірофосфатний [3, 4] та цитратний [6, 9] електроліти. Однак вони усі не ідеальні, тому пошук електролітів та умов осадження покриттів цим, корисним для промисловості, сплавом подовжується. Також подовжуються й дослідження властивостей покриттів, у тому числі корозійних. Так, порівняння швидкості корозії катодних по відношенню до сталі покриттів сплавом, отриманих з цитратного електроліту на основі сульфатних і хлоридних солей металів, виявило перевагу останніх (струм корозії 28 мкА/см² і 19 мкА/см², відповідно) [9]. Більш корозійно стійким виявилось анодне по відношенню до сталі покриття на основі інтерметалідів сплаву Cu-Zn, що осаджене двоімпульсним потенціостатичним методом з гліцерол-лужного електроліту (струм корозії 12,6 мкА/см²) [10]. Для підвищення антикорозійного захисту перспективні мультишарові покриття, які складаються з тонких шарів сплавів різного складу, що чергуються та забезпечують перекивання пір в шарах покриття [11]. Полілігандний пірофосфатно-

цитратний електроліт [12] дозволяє у широкому діапазоні варіювати хімічний та фазовий склад сплаву. Тому аналіз корозійних властивостей як одношарових, так й мультишарових покриттів різної товщини, отриманих у цьому електроліті, дозволить обрати архітектуру покриттів для забезпечення підвищення їх корозійної стійкості.

Метою досліджень було порівняння корозійних властивостей мультишарових покриттів на основі сплавів мідь-цинк, що електроосадили з пірофосфатно-цитратного електроліту, з властивостями одношарових сплавів різної товщини.

Виклад основного матеріалу дослідження.

Методика. Покриття на основі сплавів Cu-Zn отримували з пірофосфатно-цитратних електролітів із співвідношенням концентрацій компонентів $[(Cu^{2+}]:[Zn^{2+}]):[Cit^{3-}]:P_2O_7^{4-}]$ рівним (1:2):0,5:2 (електроліт «1Cu2Zn») та (1:1):0,5:2 (електроліт «1Cu1Zn») при рН розчинів 8,5. Одношарові покриття базового складу «жовтої лагуни» осаджували при густині струму 5 мА/см². Мультишарові покриття $[(Cu-Zn)_{баз}/(Cu-Zn)_{дод}]_n$, які складаються з n пар більш тонких базових шарів і додаткових шарів, осаджували двохімпульсним гальваностатичним методом.

Корозійні властивості покриттів визначали поляризаційним методом в 3,5 %-ому розчині NaCl. Струм корозії розраховували за формулою:

$$i_{кор} = \frac{b_k \cdot b_a}{2,303(b_k + b_a)R_n}, \quad (1)$$

де b_a та b_k – тафелевські коефіцієнти анодної та катодної гілки поляризаційної залежності, відповідно, мВ, R_n – поляризаційний опір, Ом·см².

Поляризаційні залежності одержані з використанням потенціостату Р-45Х у триелектродній комірці. Робочим електродом була пластина з вуглецевої сталі з покриттям. Використано допоміжний електрод з платини та насичений хлорид-срібний електрод порівняння, відносно якого наведені значення потенціалів.

Результати досліджень. Корозійні властивості мультишарових покриттів $[(Cu-Zn)_{баз}/(Cu-Zn)_{дод}]_n$ оцінювали в порівнянні з властивостями базових одношарових покриттів сплаву Cu-Zn. Покриття сплавом $(Cu-Zn)_{баз}$ базового складу осаджували в умовах перемішування при густині струму 5 мА/см², мультишарові покриття $[(Cu-Zn)_{баз}/(Cu-Zn)_{дод}]_n$ формували у режимі $[(30 \text{ мА/см}^2 - \text{до } 0,033 \text{ Кл/см}^2) / (5 \text{ мА/см}^2 - \text{до } 0,08 \text{ Кл/см}^2)]_n$. Умови осадження наведено у табл. 1. Покриття осаджували на основу з вуглецевої сталі, яка має струм корозії в розчині натрію хлориду 20,3 мкА/см².

Стаціонарний потенціал тонких шарів базового сплаву, осаджених в умовах перемішування при густині струму 5 мА/см² (рис. 1 б, кр. 2), близький

до стаціонарного потенціалу сталі (кр. 1). Однак за рахунок значно більшої анодної поляризації при розчиненні шару сплаву (рис. 1 а, кр. 2) в порівнянні з розчиненням сталі (кр. 1), струм корозії покриття значно нижчий (рис. 1 б, кр. 2 і 1, відповідно).

При збільшенні товщини шару сплав збагачується цинком, внаслідок чого його стаціонарний потенціал стає більш негативним (рис. 1 б, кр. 3), а струм корозії вищим за рахунок більш активного розчинення зі сплаву цинкової складової в діапазоні потенціалів від стаціонарного до потенціалу $-0,32$ В (рис. 1 а, кр. 3).

Таблиця 1

Умови електроосадження і корозійні властивості покриттів

Електроліт	Шари сплаву	Перемішування	q , Кл/см ²	Струм корозії, мкА/см ²
«1Cu2Zn»	$(Cu-Zn)_{баз}$	+	0,5	3,30
«1Cu2Zn»		+	1,0	7,20
«1Cu1Zn»		+	1,0	1,70
«1Cu1Zn»	$[(Cu-Zn)_{баз}/(Cu-Zn)_{дод}]_n$	+	1,0	1,74
		–	1,0	3,58
		+	5,0	8,99
		–	5,0	22,5

При збагаченні сплаву міддю за рахунок більшого вмісту її іонів в електроліті «1Cu1Zn» стаціонарний потенціал шару базового сплаву ще близький до стаціонарного потенціалу сталі при більшій його товщині (рис. 2 б, кр. 2). При цьому тонка плівка, осаджена в електроліті «1Cu2Zn» при кількості електрики 0,5 Кл/см² (рис. 1 б, кр. 2), знижує стум корозії в 6,2 рази (див. табл. 1), а більш товста, осаджена в електроліті «1Cu1Zn» при кількості електрики 1 Кл/см² (рис. 2 б, кр. 2) та має тій же самий стаціонарний потенціал, – в 11,9 разів (див. табл. 1). При збільшенні товщини плівок також і в електроліті «1Cu1Zn» їх стаціонарний потенціал зсувається в бік більш негативних значень (рис. 1 б, кр. 3), завдяки збагаченню сплаву цинком при збільшенні часу осадження.

Збільшення вмісту збагачених цинком фаз в сплав як за рахунок збільшення іонів цинку в електроліті (рис. 2 а, кр. 2 і 3), так й збільшення товщини шару сплаву, який в ньому осаджують (рис. 1 а, кр. 2 і 3), супроводжується збільшенням поляризуємості анодного процесу, внаслідок чого при високих анодних густинах струму поляризація перевищує поляризацію при розчиненні шарів, які більше збагачені міддю. Це дозволяє прогнозувати більшу корозійну стійкість покриття сплавом в умовах тривалої експлуатації, після розчинення фази вільного цинку зі сплаву й зміни катодного характеру захисту основи зі сталі на анодний.

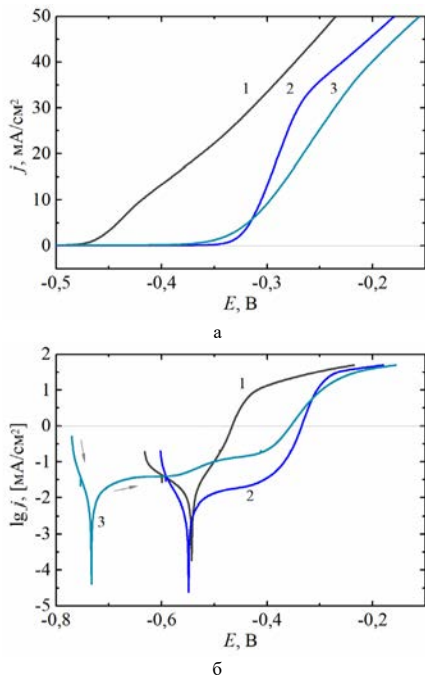


Рис. 1. Анодні поляризаційні залежності (а) і корозійні діаграми (б) вуглецевої сталі (1) і базових покриттів, що осаджені з електроліту «1Cu2Zn» при густині струму 5 мА/см² в умовах перемішування з витратами кількості електрики 0,5 Кл/см² (2) і 1,0 Кл/см² (3)

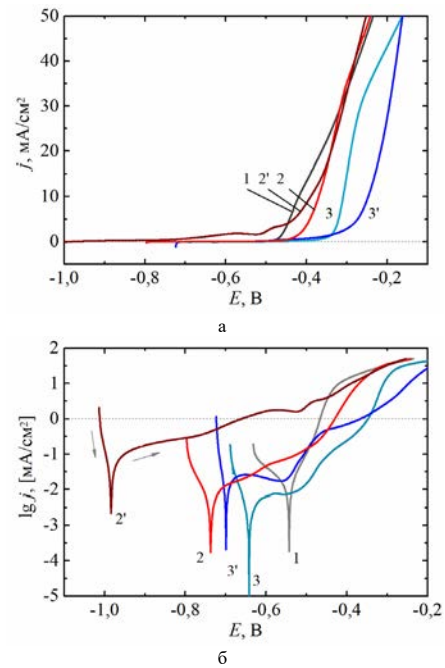


Рис. 3. Анодні поляризаційні залежності (а) і корозійні діаграми (б) вуглецевої сталі (1) і мультишарових покриттів [(Cu-Zn)_{баз}/(Cu-Zn)_{дод}]_n, що осаджені з електроліту «1Cu1Zn» в режимі [(30 мА/см² – до 0,033 Кл/см²)/(5 мА/см² – до 0,08 Кл/см²)]_n без (2, 2') і з (3, 3') перемішуванням з витратами кількості електрики 1 Кл/см² (2, 3) і 5 Кл/см² (2', 3')

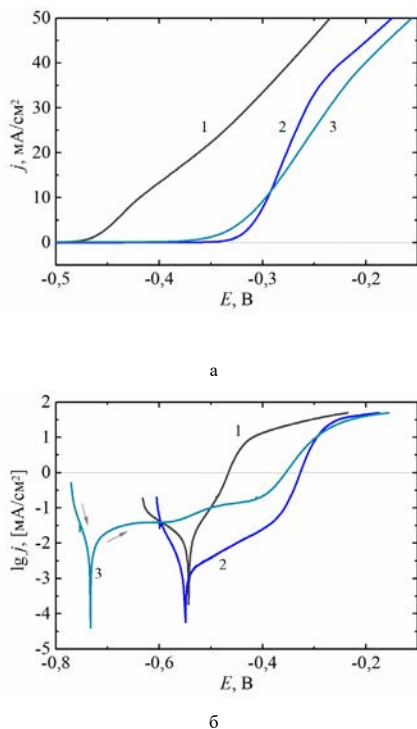


Рис. 2. Анодні поляризаційні залежності (а) і корозійні діаграми (б) вуглецевої сталі (1) і базових покриттів, що осаджені з електроліту «1Cu1Zn» (2) і «1Cu2Zn» (3) при густині струму 5 мА/см² в умовах перемішування з витратами кількості електрики 1,0 Кл/см²

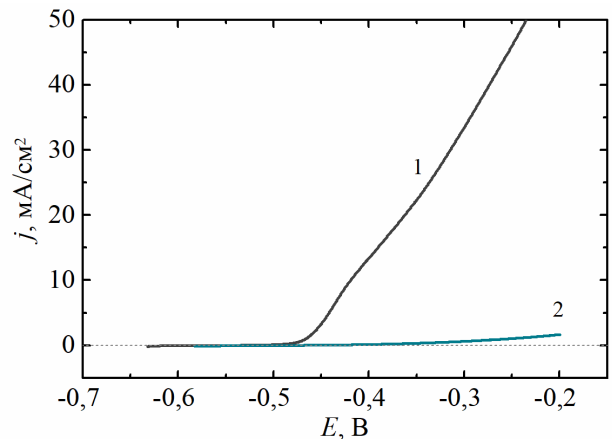


Рис. 4. Анодні поляризаційні залежності вуглецевої сталі (1) і покриття [(Cu-Zn)_{баз}/(Cu-Zn)_{дод}]_n (2) після зберігання в лабораторній атмосфері протягом 6 місяців

Мультишарові покриття [(Cu-Zn)_{баз}/(Cu-Zn)_{дод}]_n, в яких шари базового сплаву перемежуються з шарами сплаву, більш збагаченими цинком, які осаджують при густині струму 30 мА/см², мають більш негативне значення стаціонарного потенціалу, однак, при цьому, в порівнянні з базовим покриттям, вони мають значно меншу поруватість та близьке значення струму корозії до значення струму корозії найкращого шару, (Cu-Zn)_{баз} [13].

Використання перемішування при осадженні покриттів $[(\text{Cu-Zn})_{\text{баз}}/(\text{Cu-Zn})_{\text{дод}}]_n$ супроводжується збільшенням міді в складі сплаву та відповідними змінами властивостей: зсувом потенціалу корозії в бік позитивних значень (рис. 3 б, кр. 2 і 3; рис. 3 б, кр. 2' і 3'), збільшенням анодної поляризації в хлориді натрію (рис. 3 а, кр. 2 і 3; рис. 3 а, кр. 2' і 3'), зменшенням у 2-2,5 рази струму корозії (табл. 1).

Як без перемішування, так й в умовах перемішування зі збільшенням товщини покриття $[(\text{Cu-Zn})_{\text{баз}}/(\text{Cu-Zn})_{\text{дод}}]_n$ значення корозійного струму проходять через мінімум (струм корозії $1,74 \text{ мкА/см}^2$), зумовлений зміною складу шарів з часом осадження і механізму корозії від сумісного зі сталлю, у разі тонких плівок, до власного корозійного процесу, у разі більш товстих та без пористих. З товщиною покриття потенціал корозії зсувається у бік менш позитивних значень (рис. 3 б), анодна поляризація в хлориді натрію зростає (рис. 3 а).

Після тривалого, протягом півроку, зберігання в атмосфері лабораторії поверхня покриттів окислюється. За рахунок вкрай низьких значень густини струму розчинення покриттів в корозійно активному середовищі (рис. 4, кр. 2) та з урахуванням низької поруватості мультишарових покриттів, захисні властивості покриття значно зростають.

Слід зазначити високу корозійну стійкість мультишарових покриттів $[(\text{Cu-Zn})_{\text{баз}}/(\text{Cu-Zn})_{\text{дод}}]_n$, струм корозії яких, що є навіть анодними по відношенню до сталі, залишається менший ніж струм корозії покриттів на основі сплавів мідь-цинк не тільки катодних по відношенню до сталі покриттів латунню, а й анодних, що отримані іншими способами [9, 10].

Висновки. Дослідження поляризаційним методом корозійних властивостей одношарових і мультишарових покриттів сплавами мідь-цинк, які електроосаджені з пірофосфатно-цитратного електроліту, показало, що:

– при зменшенні вмісту збагачених цинком фаз в сплаві як за рахунок зменшення іонів цинку в електроліті, так й за рахунок зменшення товщини шарів сплаву досягається зсув стаціонарного потенціалу в розчині натрію хлориду в бік більш позитивних значень, більша поляризації анодного процесу поблизу стаціонарного потенціалу з відповідним зменшенням струму корозії;

– використання перемішування при електроосадженні мультишарового покриття на основі сплавів мідь-цинк призводить до формування покриттів, струм корозії яких знижується у 2–2,5 рази в порівнянні з мультишаровими покриттями, що отримані без накладення перемішування;

Список літератури:

1. Fujiwara Y., Enomoto H. Electrodeposition of β' -Brass from Cyanide Baths with Accumulative Underpotential Deposition of Zn. *Journal of the Electrochemical Society*. 2000. Vol. 147. No. 5. P. 1840.
2. Ibrahim M.A., Bakdash R. S. New cyanide-free ammonia bath for brass alloy coatings on steel substrate by electrodeposition. *Int. J. Electrochem. Sci.* – 2015. Vol. 10. No. 2105. P. 9666.
3. Hacıbrahimoglu M., Yavuz A., Oztas M., Bedir M. Electrochemical and structural study of zinc-rich brass deposited from pyrophosphate electrolyte onto the carbon steel Dig. *J. Nanomater. Biostruct.* 2016. Vol. 11. P. 251–262.
4. Senna L.F. Díaz S.L., Sathler L. Hardness analysis and morphological characterization of copper-zinc alloys produced in pyrophosphate-based electrolytes. *Materials Research*. 2005. Vol. 8. No. 3. P. 275-279.
5. Özdemir R., Karahan İ. H., Karabulut O. A study on the electrodeposited Cu-Zn alloy thin films. *Metallurgical and Materials Transactions A*. 2016. Vol. 47. No. 11. P. 5609–5617.
6. Ballesteros J.C., Gómez-Solís C., Torres-Martínez L.M., Juárez-Ramírez I. Electrodeposition of Cu-Zn intermetallic compounds for its application as electrocatalyst in the hydrogen evolution reaction. *Int. J. Electrochem. Sci.* 2015. Vol. 10. P. 2892–2903.
7. Yurdal K., Karahan İ.H. Phase Formation in Electrodeposited Cu-Zn Alloy Films Produced from Ultrasonicated Solutions. *Acta Physica Polonica A*. 2017. Vol. 132. No. 3. P. 1091–1094.
8. Page D., Roy S. Electrodeposition of thin film Cu-Zn shape memory alloys. *Le Journal de Physique IV*. 1997. Vol. 7. No. C5. P. C5-269–C5-274.
9. Oulmas C., Mameri S., Boughrara D., Kadri A., Delhalle J., Mekhalif Z., Benfedda B. Comparative study of Cu-Zn coatings electrodeposited from sulphate and chloride baths. *Heliyon*. 2019. Vol. 5. No. 7. P. e02058.
10. Das S., Jena S., Banthia S., Mitra A., Das S., Das K. Novel pulse potentiostatic electrodeposition route for obtaining pure intermetallic Cu₅Zn₈-CuZn composite coating using glycerol-NaOH based electrolyte with advanced scratch resistance and anti-corrosive properties. *Journal of Alloys and Compounds*. 2019. Vol. 792, P. 770–779.
11. Maizelis A. Electrochemical Formation of multilayer coatings: copper-nickel alloys and oxo-hydroxides : monograph. Lap Lambert Academic Publishing, 2021. 173 p.

12. Спосіб електроосадження мідно-цинкового покриття: пат. 143138 Україна: МПК6 C25D 3/58, C25D 5/10, C25D 5/18. № u202000988; заявл. 17.02.2020; опубл. 10.07.2020, Бюл. № 13. 6 с.

13. Maizelis A. Corrosion properties of nanostructured multilayer $[(\text{Cu-Zn})_1/(\text{Cu-Zn})_2]_n$ coatings. *Nanomaterials, Applications & Properties* : Proceedings of IEEE 12th International Conference Nanomaterials (Kraków, September 11–16, 2022). IEEE, 2022. P. 1–4.

Maizelis A.O. CORROSION PROPERTIES OF $[(\text{Cu-Zn})_{\text{base}}/(\text{Cu-Zn})_{\text{add}}]_n$ MULTILAYER COATINGS

The level of corrosion resistance of copper-zinc alloy coatings is important not only in the case of their use as protective, but also in the case of use as decorative and functional coatings. The manuscript is devoted to a comparative analysis of the corrosion properties of multilayer coatings, which consist of copper-zinc alloy layers of different compositions of nanoscale thickness, electrodeposited from a pyrophosphate-citrate electrolyte, with the properties of single-layer coatings with this alloy in order to optimize their architecture. The object of research is corrosion parameters in a sodium chloride solution of $(\text{Cu-Zn})_{\text{base}}$ single-layer coatings of the base composition and $[(\text{Cu-Zn})_{\text{base}}/(\text{Cu-Zn})_{\text{add}}]_n$ multilayer coatings, in which the base layers alternate with additional ones by using during the deposition of the two-pulse galvanostatic method. The parameters are determined by the polarization method using the P-45X potentiostat. It was found that with the time of electrodeposition, the alloy deposit is enriched with more electronegative zinc, its corrosion potential shifts towards negative values and the corrosion current increases. A change in the concentration ratio of metal ions in the electrolyte in favor of copper is accompanied by a shift in the steady-state potential of a steel sample coated with an alloy in a sodium chloride solution toward more positive values, a greater polarization of the anodic process near the steady-state potential with a corresponding decrease in the corrosion current. When stirring is used during the deposition of multilayer coatings, their corrosion potential in sodium chloride solution shifts toward more positive values, but the coatings remain anodic in relation to carbon steel, and the corrosion current is reduced by 2-2.5 times. It is shown that multilayer coatings obtained from pyrophosphate-citrate electrolyte by the two-pulse galvanostatic method are more corrosion resistant compared to coatings obtained under other conditions based on a copper-zinc alloy of different composition, both cathodic and anodic as compared to carbon steel.

Key words: copper; zinc; brass; multilayer coatings; corrosion properties; pyrophosphate-citrate electrolyte.

УДК 623

DOI <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2023.5/53>**Черкашина Г.М.**

Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут»

Лебедєв В.В.

Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут»

Копилов С.О.

Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут»

Близнюк О.В.

Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут»

Кривобок Р.В.

Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут»

СУЧАСНІ КОМПОЗИЦІЙНІ МАТЕРІАЛИ ДЛЯ ВИГОТОВЛЕННЯ ЗАСОБІВ ІНДИВІДУАЛЬНОГО БРОНЕЗАХИСТУ

У статті показані дослідження з огляду сучасних композиційних матеріалів для виготовлення засобів індивідуального бронезахисту. Розробка ефективних засобів індивідуального бронезахисту є складним завданням через велику кількість тактико-технічних вимог, що суперечать один одному, і факторів, що впливають на бойову ефективність, а також неможливості точного передбачення характеру бойових дій. Останнім часом відзначається досить динамічний розвиток науки та техніки у цих галузях. Все більш широке застосування знаходить надвисокомодульний поліетилен та броньова кераміка, оптимізуються структури на основі арамідних тканин, розвиваються методи розрахунку та синтезу структур, уточнюються вимоги до рівнів та площ захисту – засоби індивідуального бронезахисту. Для виготовлення матеріалів бронезилетів, призначених для одноразового утримання високошвидкісного високоенергетичного удару різної інтенсивності використовують різні типи композиційних матеріалів. Для виготовлення конструкцій, призначених для одноразового утримання високошвидкісного удару використовуються органо– та склопластики на основі «крихких» полімерних матриць з високою енергією руйнування. Показано, що при розробці полімерних композиційних броньових матеріалів, ефективних як захисних від високошвидкісних інденторних впливів, аналіз властивостей полімерних композиційних матеріалів з полімерними волокнами, у тому числі безперервними, і тканинами з них в якості наповнювачів. Виходячи з аналізу світових тенденцій у галузі створення високоефективної комбінованої броні на основі неметалічних матеріалів, необхідно створити нову полегшену комбіновану броню, що складається з керамічної основи, арамідної підкладки із заданою орієнтацією армуючих ниток та полімерної матриці з низькою температурою затвердіння. Розробка нових матеріалів із меншою вартістю виготовлення дозволить за рівних витрат збільшити захисні властивості бронеелементів.

Ключові слова: засоби індивідуального броньованого захисту, бронезилет, броньові матеріали, полімерні композити, кераміка.

Постановка проблеми. В даний час в нашій країні і за кордоном виробляється велика номенклатура засобів індивідуального бронезахисту різного конструкторсько-технологічного та ергономічного виконання, орієнтованого на широкий спектр областей можливого застосування.

Максимальна ефективність засобів індивідуального бронезахисту проявляється при виконанні бойових завдань, не пов'язаних із тривалими активними пересуваннями: несення варті, марші на техніці, короткочасні штурмові акції,

тому застосування грудних і спинних бронепанелей виправдане тільки при малорухливих діях бійця у вертикальному положенні. При тривалих маршах, веденні бойових дій у гірських умовах, розвідці та інших видах бойової діяльності, що потребують граничної напруги сил, носіння протипульних бронепанелей недоцільне.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Аналіз літературних джерел [1, с. 307; 2, с. 24] показав, що під поняттям «засіб індивідуального бронезахисту» в цілому розуміється його здат-

ність захищати різні частини тіла людини від впливу вогнепальної, холодної, ріжучої, колочної зброї, ударної та ударно-дробної дії, а також забезпечення виключення або мінімізації заброньової локальної контузійної травми та механічних ушкоджень [3, с. 4567]. У дослідженні А. Е. Джассема, А. Д. Джавада, А. О. Самармада, А. Ф. Хамза [4, с. 550] запропоновано альтернативні матеріали для розробки броні, що складається з модифікованої гуми та ебоніту, а також керамічних частин на основі оксиду алюмінію шестикутної структури, кевлару та вуглецю та сучасні технології згущувальних рідин. В статті [5, с. 133] Бобрової С. Ю. та Галавської Л. Є. описана розробка балістичних трикотажних полотен для виготовлення засобів бронезахисту. Також була розроблена та досліджена еластомерно-сталева ламінована броня [6, с. 259].

Метою статті є дослідження сучасних композиційних матеріалів для виготовлення засобів індивідуального бронезахисту.

Завдання статті:

- визначити вимоги та характеристики сучасних бронезилетів;
- проаналізувати особливості складу композиційних матеріалів для виготовлення засобів індивідуального бронезахисту.

Виклад основного матеріалу дослідження.

Усі сучасні бронезилети відповідно до стандарту НАТО STANAG 4569 за рівнями захисту діляться на шість класів. Сьогодні 2-й клас гарантує захист від усіх пістолетних куль, включаючи ТТ та ПСМ. Щоб забезпечити цей рівень захисту, розробник має в розпорядженні не так багато броньових матеріалів і вже відпрацьованих захисних структур із комбінації цих матеріалів. Так, захисна структура із сталевим бронеелементом матиме товщину 2,5–3,0 мм, масу 1 дм² – 187 г, з поліетиленовим жорстким бронеелементом – товщину 11 мм, масу 1 дм² – 104 г.

Важливою характеристикою бронезилета є не тільки маса, що впливає на сумарну бойову ефективність, але і зручність застосування. Носіння бронезилетів ускладнює теплообмін і в спекотному кліматі може призвести до перегріву бійця та втрати боєздатності. Поява нових типів ефективних броньових боєприпасів висунула перед розробниками легкоброньованої та неброньованої техніки актуальне завдання – підвищення її захищеності, а також захищеності людей, які перебувають у ній. Броньовий захист як у військовій галузі, так і в цивільній галузі розвивається в напрямку одержання та використання матеріалів

з високими захисними властивостями та нижчою, ніж у традиційно використовуваної металевій броні, густиною [1, с. 307; 2, с. 24]

Перспективним шляхом вирішення проблеми підвищення стійкості та зниження маси броньового захисту, поряд із традиційними методами, стала розробка комбінованої броні з керамічним лицьовим шаром та підкладкою з композиту або металу, що має підвищену стійкість до дії броньових куль. Така структура броні дозволяє у 2-3 рази знизити масу виробу з неї порівняно з масою виробу із рівностійкої сталевій броні високої твердості.

Виходячи з аналізу світових тенденцій у галузі створення високоефективної комбінованої броні на основі неметалічних матеріалів, необхідно створити нову полегшену комбіновану броню, що складається з керамічної основи, арамідної підкладки із заданою орієнтацією армуючих ниток та полімерної матриці з низькою температурою затвердіння.

Для виготовлення матеріалів бронезилетів, призначених для одноразового утримання високошвидкісного високоенергетичного удару різної інтенсивності використовують:

1) тканини різної текстури на основі волокон з ароматичних поліамідів (Kevlar, Twaron та ін.), надвисокомолекулярного поліетилену (НВМПЕ) (Spectra, Dyneema та ін.) – полімерна текстильна (ткана) броня;

2) органо- і склотекстоліти на основі тканин з волокон Kevlar, скляних та їх сумішей з полімерними та термореактивних (олігоакрилати, олігоmaleїнати, епоксидні), термопластичних (блоксополімерні, іономірні), еластомерних навантажень – полімерна композиційна броня;

3) супергібридні полімер-металеві та полімер-керамічні міжшарові композиційні матеріали – комбінована броня;

4) нанополімерні матеріали на основі полімерних гелів та електроактивні полімери.

У полімерних текстильних броньових матеріалах, що забезпечують захист від високошвидкісного інденторного впливу (м'яка броня) використовують багатошарові пакети з тканин (і повстяних) з певним плетінням волокон (текстура). Найбільш ефективними є тканини з волокон зі специфічною фібрилярною структурою, що утворюється на стадії витяжки з розчинів, розплавів, гелів, волокнуотворюючих полімерів при оптимальному ступені витяжки. Найбільше застосування як компонент матеріалів «м'якої» броні отримали волокна з ароматичних поліамідів Kevlar (DuPont, США), Twaron (Enka, Нідерланди) і волокна з НВМПЕ Spectra (Allied Fibers, США), DYNEEMA (DSM, Нідерланди).

Для багатьох полімерів в орієнтованому стані характерна фібрилярна структура з чергуванням аморфних і кристалічних ділянок з періодичністю порядку одиниць-десятків нм. При витягуванні багатьох видів волокон спостерігається зміна характеру залежності властивостей волокна від кратності витягування, що пов'язано зі зміною механізму орієнтації, розворотом кристалітів, перебудовою аморфних областей, формуванням фібрилярних структур.

Утримання високошвидкісного удару полімерними волокнами з фібрилярною структурою забезпечується комплексним механізмом гальмування зростання тріщин:

1) створення бар'єрів на шляху тріщин – фібрилярне розщеплення волокон на площині з мінімальною поверхневою енергією; участю міжфібрилярної взаємодії у перерозподілі механічних напруг між структурними елементами волокна та міжфазною областю; розгалуженням тріщин переважно в аксіальному напрямку, внаслідок чого поверхня руйнування волокон у сотні разів перевищує площу їх поперечного перерізу; участю міжфазної області у перерозподілі та релаксації напруг;

2) затупленням вершини тріщини внаслідок багатостадійного перебігу релаксаційних процесів; демпфуванням і релаксацією напруг при створенні зростаючої тріщини: поверхнею через низький ЕІ волокон;

3) низькою чутливістю волокон до концентраторів напруги;

4) сильною фібриляцією з відщепленням мікрофібрил з поверхні волокон зі збільшенням деформації, накопиченням дефектів.

Дослідження, проведені на зразках «м'якої» (тканинної) броні з тканин ТСВМ (арт. ДЖ-56319) саржевого переплетення, тканини з волокон Twaron (фірма Akzo Nobel), тканини Twaros (полотно з ниток Twaron 93 текс), виготовлених на основі волокон підшліхтованих, відмитих та гідрофобізованих, показали складність та багатфакторність стійкості «м'якої» броні, яка підвищується при збільшенні енергоємності тканинного матеріалу (його міцності та деформованості). Стійкість броні визначає комплекс властивостей (деформований обсяг, його форма, поля навантажень-деформацій, коефіцієнти зовнішнього тертя, кількість адсорбованої вологи, частота та амплітуда коливань динамічного «завантаження», швидкості поширення оборотної та незворотної деформацій) і особливо текстуру тканини. Так, викривленість ниток у тканині Twaros полотняного плетіння в порівнянні з тканиною ТСВМ

(саржа) з урахуванням зазору між нитками, що залежить від ступеня натягу в 1,25 рази вище.

Важливою властивістю арамідних ниток (як багатьох інших волокнистих конструкцій) є дискретність їх структури. Кожна нитка складається з багатьох моноволокон (філаментів). Дискретність структури визначає високу стійкість ниток до згинальних напруг.

Полімерна броня з непросочених полімерними сполучними тканин з певним плетінням волокон застосовується як захист від високошвидкісних ударних навантажень конструкцій гелікоптерів, літаків, ВМД (захист конструкцій при руйнуванні розділових кілець турбінних лопаток). Так, кільцевий екран товщиною 38 мм, сформований з 75–100 шарів тканин з поліарамідних волокон, затримує уламки зруйнованого колеса з частотою обертання 6000 об/хв з ванадій-нікель-хромового сплаву.

До переваг текстильної броні при порівнянні її з іншими захисними структурами 1–2 класу захисту слід віднести меншу вагу і більший комфорт при експлуатації виробу. Товщина тканих бронепакетів різних фірм-виробників коливається від 6–7 мм для 1 класу захисту до 18–20 мм. – для 2-го. У складі захисних структур можуть застосовуватися демпфери різних конструкцій зменшення травмування організму людини.

При розробці полімерних композиційних броньових матеріалів, ефективних як захисних від високошвидкісних інденторних впливів, аналіз властивостей полімерних композиційних матеріалів з полімерними волокнами, у тому числі безперервними, і тканинами з них в якості наповнювачей (волокнисті полімерні композиційні матеріали (ВПКМ), органоволокніти та органотекстоліти на основі термореактивних), органопластики, органіти), що характеризують їх поведінку при статичних та динамічних навантаженнях зі швидкістю деформування при ударі $e^* = 10^{-3} \text{ с}^{-1}$ (руйнівна напруга, тріщиностійкість, коефіцієнти концентрації напруг, енергоємність руйнування при ударі та ін.), є лише першим кроком до оптимізації складу та структури матеріалів з необхідною динамічною працездатністю при $e^* = 10^2\text{--}10^4 \text{ с}^{-1}$.

Використання ВПКМ різного складу та структури як броньові матеріали має ряд особливостей. Пенетрації високошвидкісного індентора в багатошарові пакети з тканин травмують волокна, які деформуються з розтягуванням і стиском і поглинають енергію удару при руйнуванні.

Для виготовлення конструкцій, призначених для одноразового утримання високошвидкісного удару використовуються органо– та склопластики

на основі «крихких» полімерних матриць з високою енергією руйнування. При високошвидкісному ударному впливі накопичення дефектів у ВПКМ спочатку йде окремо у матриці та волокнах (у матриці та скляних волокнах – хаотична система тріщин, у полімерних волокнах накопичуються аксіальні тріщини з локальним обривом фібрил).

Руйнування полімерних волокон (Kevlar, НВМПЕ) при розтягуванні проходить по міжфібрилярному механізму з вируванням ділянок мікрофібрил. При збільшенні деформації відбувається сильна фібриляція з відщипуванням мікрофібрил із поверхні волокон.

Опишемо особливості комбінованих (супергібридних) полімер-металевих та полімер-керамічних броньових матеріалів та конструкцій. Полімерні текстильні та композиційні матеріали не ефективні для захисту від високошвидкісних (1000–1100 м/с) куль і осколків та низькошвидкісних куль особливої конструкції, що розсувають нитки в тканинах, що пролітають між нитками, не руйнуючи їх. У цих випадках захист від високошвидкісних ударних впливів, запобігання penetрації захисних матеріалів здійснюється використанням багатошарових комбінованих (супергібридних) захисних конструкцій (полімер-металева, полімер-керамічна броня). Комбінована броня заснована на використанні різних поєднань різних типів броні, наприклад, шарів з тканин і металевих або керамічних бронееlementів, шарів з органопластиків з волокнами або тканинами з волокон ароматичних поліамідів, НВМПЕ з бронееlementами з металів або кераміки, пластиків.

Особливості поглинання енергії високошвидкісного удару різними матеріалами дозволяють розділити захисну конструкцію на функціональні шари, що виконують специфічні завдання:

1) гальмування високошвидкісних інденторів, деформація (розплющування) головної частини бронейного індентора, його руйнування у шарах з високою в'язкістю руйнування, високим рівнем поглинання енергії високошвидкісного удару (тверді бронейлети, пластини, шари з металів, керамік, ВПК);

2) зупинка індентора (залишків кулі, уламків) у шарах, сформованих з полімерних волокон (тканинних пакетах). Жорсткі шари з ВПКМ дозволяють реалізувати високу міцність при стисканні керамічних елементів, наклеєних на їхню поверхню, а висока міцність органо- і склопластиків істотно знизити енергію індентора. Низька щільність полімерних шарів дозволяє оптимізувати масу всієї багатошарової захисної конструкції.

Принцип проектування комбінованої броні полягає в забезпеченні зниження впливу індентора до такого рівня, при якому після penetрації індентором частини захисної конструкції, його залишкова енергія вже недостатня для penetрації шарів захисної конструкції, що залишилися. У бронейлетах 5 та 6 класів захисту використовуються, як мінімум, два типи матеріалів (тканини з поліарамідних або НВМПЕ – волокон та бронееlementи з кераміки, сталі, титану, алюмінію). Маса м² броні зі сталевими елементами становить 50–60 кг, з керамічними (дорожче вдвічі) – 45–50 кг.

Порівняльні характеристики щодо протипульної стійкості НВМПЕ та кераміки з традиційною металевою бронєю – сталевую, титановую та алюмінієвою представлені в таблиці 1 [2, с. 24].

Видно, що поліетиленова броня, яка використовується у 2-му та 3-му класах захисту, в 5 разів товща за сталеву. Керамічна броня, що використовується в 5-му класі захисту, також мінімум у 2 рази товща за сталеву. Та й живучість такої броні, тобто здатність витримати кілька пострілів, помітно гірша, ніж у металевого аналога. Значна товщина захисної структури із нових матеріалів створює колосальні проблеми конструкторам бронейлетів. Розробити виріб прихованого носіння стає практично неможливо, навіть використовуючи пресовані поліетиленові панелі завтовшки 10–11 мм. Відомо, що бронейпанелям із поліетилену можна надати практично будь-яку форму, але ця якість не компенсує проблеми великої товщини. Цей недолік ще більш виражений у бронейлетах 3-го класу, де необхідно використовувати панель завтовшки вже 21–22 мм. Такі бронейпанелі важко компонується у бронейлетах навіть відкритого носіння.

Висновки. Показано, що при розробці полімерних композиційних броньових матеріалів, ефективних як захисних від високошвидкісних інденторних впливів, аналіз властивостей полімерних композиційних матеріалів з полімерними волокнами, у тому числі безперервними, і тканинами з них в якості наповнювачів. Виходячи з аналізу світових тенденцій у галузі створення високоефективної комбінованої броні на основі неметалічних матеріалів, необхідно створити нову полегшену комбіновану броню, що складається з керамічної основи, арамідної підкладки із заданою орієнтацією армуючих ниток та полімерної матриці з низькою температурою затвердіння. Розробка нових матеріалів із меншою вартістю виготовлення дозволить за рівних витрат збільшити захисні властивості бронееlementів.

Порівняльні характеристики захисту, виконаного з різних броньових матеріалів

Матеріал	Рівень захисту за STANAG 4569				
	1	2	3	5	6a
Броньова сталь	135/1,7*	187/2,4	343/4,4	500/6,4	860/11,0
Титан	135/3,0	155/3,5	310/7,0	445/10,0	-
Алюміній	135/5,0	190/7,0	590/22,0	860/32,0	1160/43,0
НВМПЕ	40/4,0	104/11,0	210/22,0	-	-
Арамідні тканини	35/4	100/-			
Кераміка на основі корунду (Al ₂ O ₃) на підложці з поліетилену	-	-	-	360-400/17	420-460/19
Кераміка на основі карбиду бору (B ₄ C) на підложці із НВМПЕ	-	-	-	260-290/16	340-360/20

* Поверхнева густина (г/дм³)/товщина захисної структури (мм).

Список літератури:

1. Guleria T., Verma N., Zafar S., Jain V. Fabrication of Kevlar®-reinforced ultra-high molecular weight polyethylene composite through microwave-assisted compression molding for body armor applications. *Journal of Reinforced Plastics and Composites*. 2021. Vol. 40(7–8). P. 307.
2. Pach J., Pyka D., Jamroziak K., Mayer P. The experimental and numerical analysis of the ballistic resistance of polymer composites. *Composites Part B: Engineering*, 2017. Vol. 113. P. 24.
3. Monteiro S.N., Louro L.H.L., Trindade W. Natural curaua fiber-reinforced composites in multilayered ballistic armor. *Metallurgical and Materials Transactions A*. 2015. Vol. 46(10). P. 4567.
4. Джассем А. Е., Джавад А. Д., Самармад А. О., Хамза А. Ф. Чисельні та експериментальні дослідження багатошарової броні для персонального захисту. *Фізика і хімія твердого тіла*. 2022. Т. 23. № 3. С. 550-558.
5. Боброва С. Ю., Галавська Л. Є. Розробка балістичних трикотажних полотен для виготовлення засобів бронезахисту. *Вісник Київського національного університету технологій та дизайну: Серія «Технічні науки»*. 2015. № 3 (86). С. 133-140.
6. Wang Y., Chen X., Young R., Kinloch I., Wells G. Elastomer–steel laminate armor. *Composites Part B: Engineering*. 2015. Vol. 68, P. 259.

Cherkashina G.M., Lebedev V.V., Kapilov S.O., Bliznyuk O.V., Kryvobok R.V.
MODERN COMPOSITE MATERIALS FOR THE MANUFACTURE OF INDIVIDUAL ARMOR PROTECTION

The article shows research on the overview of modern composite materials for the manufacture of individual armor protection. The development of effective means of individual armor protection is a difficult task due to a large number of conflicting tactical and technical requirements and factors affecting combat effectiveness, as well as the impossibility of accurately predicting the nature of combat operations. Recently, quite dynamic development of science and technology in these fields has been noted. Ultra-high-modulus polyethylene and armor ceramics are increasingly being used, structures based on aramid fabrics are being optimized, methods of calculating and synthesizing structures are being developed, requirements for levels and areas of protection – means of individual armor protection – are being clarified. Various types of composite materials are used for the production of body armor materials intended for one-time containment of a high-speed, high-energy impact of various intensities. Organoplastics and fiberglass based on "brittle" polymer matrices with high fracture energy are used for the manufacture of structures intended for one-time containment of a high-speed impact. It is shown that in the development of polymer composite armor materials effective as protective against high-speed indenter impacts, the analysis of the properties of polymer composite materials with polymer fibers, including continuous ones, and fabrics from them as fillers. Based on the analysis of global trends in the field of creating high-performance combined armor based on non-metallic materials, it is necessary to create a new lightweight combined armor consisting of a ceramic base, an aramid substrate with a given orientation of reinforcing threads, and a polymer matrix with a low solidification temperature. The development of new materials with a lower production cost will increase the protective properties of armor elements at the same cost.

Key words: means of individual armored protection, body armor, armor materials, polymer composites, ceramics.

ТЕХНОЛОГІЯ ХАРЧОВОЇ ТА ЛЕГКОЇ ПРОМИСЛОВОСТІ

УДК 621.37:637.142.

DOI <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2023.5/54>

Святненко Р.С.

Національний університет харчових технологій

Маринін А.І.

Національний університет харчових технологій

Шевченко О.Ю.

Національний університет харчових технологій

Позняк О.М.

Національний університет харчових технологій

Літвинчук С.І.

Національний університет харчових технологій

МІКРОБІОЛОГІЧНІ ТА ФІЗИКО-ХІМІЧНІ ВЛАСТИВОСТІ ГРЕЧАНОГО ТА АКАЦІЄВОГО МЕДУ

Якість меду природно відрізняється залежно від його географічного походження та ботанічного джерела, зібраної бджолами. Ці характеристики впливають на зовнішній вигляд меду, наприклад його світлий колір та густина; можуть вплинути на привабливість меду для споживачів. Густина меду залежить від його вологості. Чим вищий вміст води в меді, тим вищий ризик бродіння, тому мед зазвичай обробляють перед надходженням у продаж. Однак методи обробки можуть змінити поживний вміст, оригінальний смак і фізичні характеристики меду.

Стаття присвячена дослідженню мікробіологічних та фізико-хімічних показників меду різного регіонального походження. Встановлено, що гречаний мед має діастазне число (18,8 од. Готе) а акацієвий (7,2 од. Готе.), збільшений показник діастазного числа меду свідчить про більш значну активність ферменту діастази, що може бути показником його вищої якості та більш натурального походження.

Також було встановлено, що в акацієвому меді міститься більше сахарози (3,4%), ніж у гречаному меді (1,5%), що може впливати на їх смакові характеристики та стійкість. Аналіз показників масової частки води вказує на близькі показники: гречаний мед – 19,4%, акацієвий мед – 18,2%. Результати дослідження показника рН вказують на незначну відмінність показників.

Під час аналізу мікробіологічних показників меду було встановлено, що гречаний мед мав наявність аеробних бактерій на рівні 5.5×10^3 КОУ/г, тоді як у акацієвого меду ця кількість становила 5.1×10^3 КОУ/г.

На основі органолептичних показників встановлено, що гречаний мед має темно-коричневий колір, приємний аромат, приємний смак, в'язку консистенцію та присутню кристалізацію, тоді як акацієвий мед має світло-прозорий колір, слабо виражений аромат, солодкий смак, в'язку консистенцію та присутню кристалізацію.

Отримані результати дослідження меду свідчать про відповідність якісних показників продукту вимогам ДСТУ 4497:2005 «Мед натуральний. Технічні вимоги».

Ключові слова: мед, органолептичні показники, фізико-хімічні показники, мікробіологічні показники, ботанічне походження меду.

Постановка проблеми. Мікробіологічне забруднення меду є актуальною та серйозною проблемою в галузі продовольчої безпеки та здоров'я споживачів. Хоча мед вважається природним продуктом з високою стійкістю до мікробіологічного забруднення завдяки

своїм властивостям, недостатні контрольні заходи та неправильне зберігання можуть сприяти зростанню та поширенню мікроорганізмів в меді [1, с. 383].

Забруднення меду патогенними мікроорганізмами, такими як бактерії (наприклад, Salmonella,

Escherichia coli, *Listeria monocytogenes*), пліснява (наприклад, *Aspergillus*, *Penicillium*) та дріжджі, може мати потенційно шкідливі наслідки для споживачів. Ці мікроорганізми можуть викликати захворювання, алергічні реакції, токсикози та інші негативні ефекти на здоров'я людини, особливо у вразливих груп населення, таких як діти, літні люди [1, с. 384].

Однак, дослідження та свідомість про мікробіологічне забруднення меду є обмеженими. У багатьох країнах нормативна база та контроль якості меду не враховують достатньо мікробіологічну безпеку. Норми, межі безпечних рівнів мікробіологічного забруднення та методи визначення мікроорганізмів в меді можуть відрізнятися в різних країнах або відсутні зовсім. Це створює ризик поширення мікробів у меді та загрозу для здоров'я споживачів [2, с. 286].

Тому, важливо звернути увагу на проблему мікробіологічного забруднення меду та вивчити основні джерела забруднення, ідентифікувати патогенні мікроорганізми, їх потенційні наслідки для здоров'я та розробити ефективні стратегії контролю та запобігання мікробіологічному забрудненню меду.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Мед може містити різноманітні мікроорганізми, включаючи бактерії, плісняву та дріжджі. Ці мікроорганізми можуть бути присутні в меді внаслідок контакту з рослинами, нектаром, пилом, доданими інгредієнтами або забруднених умов виробництва [3, с. 109].

Мед має природні хімічні властивості, такі як низький рН та вміст вологи, які можуть гальмувати розмноження мікроорганізмів. Проте, деякі мікроорганізми можуть виживати і розмножуватися в меді, особливо якщо він має високу вологість або забруднений зовнішніми джерелами [4, с. 58; 5, с. 23].

Наявність мікроорганізмів в меді може мати наслідки для якості та безпеки продукту. Деякі види бактерій, наприклад, можуть бути патогенними і викликати захворювання у споживачів. Крім того, мікроорганізми можуть впливати на хімічний склад меду та знижувати його якість [4, с. 60].

Авторами було підтверджено наявність мікроорганізмів у меді, незважаючи на його високу осмолярність, низьку активність води та обмежену кількість поживних речовин. Ці мікроорганізми можуть бути походженням з різних джерел, таких як пилок, пил, повітря, ґрунт, та нектар [6, с. 1854].

У публікації автори [7, с. 159] провели дослідження з метою вивчення ролі меду як резервуару для мікроорганізмів і його впливу на мікробіологічну активність, та підтвердили, що мед містить різноманітну мікробіоту, що може бути присутньою в ньому. Вони виявили наявність бактерій, грибів та інших мікроорганізмів у зразках меду. Це свідчить про те, що мед може функціонувати як резервуар для цих мікроорганізмів. Крім того, автори дослідили інгібіторні властивості меду щодо мікробів. Вони встановили, що мед має здатність гальмувати ріст та розмноження мікробів. Це може бути пов'язано з різними факторами, такими як низька активність води, висока осмолярність та наявність антимікробних сполук.

У публікації [8, с. 70] досліджували мікробіологічну якість меду з регіону Пампа (Аргентина) на протязі всього процесу його видобування. Результати дослідження показали, що мед з регіону Пампа містить мікроорганізми, проте рівень мікробіологічного забруднення може змінюватись протягом процесу видобування. Зокрема, виявлено, що на початковому етапі збору меду він мав найнижчий рівень мікробіологічного забруднення, але цей рівень збільшувався наступними етапами обробки та фасування. Було виявлено наявність різних мікроорганізмів у меді, таких як бактерії роду *Lactobacillus*, гриби роду *Candida* та пліснява роду *Penicillium*.

У статті автори [9, с. 15] досліджували наявність та розповсюдження мікроорганізмів у меді. Вони досліджували бактерії, дріжджі, плісняву та інші мікроорганізми, які можуть бути присутні у меді. Результати дослідження показали, що мед може містити різноманітну мікрофлору, включаючи бактерії родів *Bacillus*, *Lactobacillus*, і *Micrococcus*, дріжджі роду *Candida*, і плісняву роду *Aspergillus* та *Penicillium*. Виявлено, що розподіл мікроорганізмів у меді може варіюватись в залежності від походження меду та умов його збирання та обробки.

У цій статті [10, с. 161] досліджували наявність антибіотиків, пестицидів та мікробних забруднень у меді і їх потенційну небезпеку для здоров'я людини. Результати дослідження показали, що деякі зразки меду містять антибіотики, такі як тетрацикліни, амоксицилін та інші, які можуть бути введені в мед шляхом лікування бджіл антибіотиками. Це може мати негативний вплив на споживачів, особливо на тих, хто має алергію на антибіотики або може розвинути резистентність до них.

Метою дослідження – проаналізувати фізико-хімічні характеристики декількох видів природ-

ного меду з різним ботанічним походженням, а також вивчити їх мікробіологічні показники.

Досліджували мед різного ботанічного походження а саме гречаний та акацієвий, що був придбаний у приватних пасічників Бориспільського району Київської області. Для визначення органолептичних та фізико-хімічних показників використовували стандартизовані методи дослідження: масову частку води визначали на рефрактометрі АТАГО – PAL 22S, діастазне число меду за стандартизованим методом зазначеним у ДСТУ 4497:2005 «Мед натуральний. Технічні вимоги» [11, с. 4], рН в меді визначали за допомогою Seven Compact pH meter S220. Визначення вмісту цукрів проводилось на вискоэффективному рідинному хроматографі з використанням рефрактометричного детектору Agilent Technologies 1200 Series. Мікробіологічні показники меду визначали за методикою [12, с. 8].

Виклад основного матеріалу. Для визначення якості меду використовували різні стандартизовані фізико-хімічні показники. Вміст вологи є ключовим показником, оскільки він вказує на наявність домішок і впливає на якість та тривалість зберігання меду. Вимірювання цього показника також важливо для забезпечення безпеки харчових продуктів. Крім того, інші показники, такі як вміст цукрів, кислотність, мінеральний склад, активність ферментів та кольорові характеристики, допомагають визначити поживну цінність, смакові властивості та можливості застосування меду в лікуванні та профілактиці захворювань. Діастазне число Готе вказує на природність та якість меду, а рН-показник відображає його кислотно-основну характеристику, що може свідчити про автентичність продукту та його обробку [13, с. 132].

Результати досліджень фізико – хімічних гречаного та акацієвого меду представлені на рис. 1.

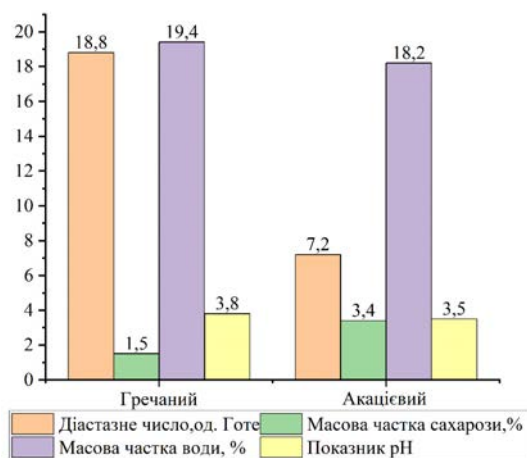


Рис. 1. Фізико-хімічні показники гречаного та акацієвого меду

З отриманих результатів (рис. 1) встановлено що, гречаний мед характеризується вищим діастазним числом, од. Готе 18,8 порівняно з акацієвим медом 7,2. Це свідчить про більш значну активність ферменту діастази в гречаному меді, що може вказувати на його вищу якість та більш натуральне походження.

У той же час, масова частка сахарози в гречаному меді 1,5 нижча, ніж у акацієвого меду 3,4. Це може означає, що акацієвий мед містить більше сахарози, що може впливати на його смакові якості та стійкість.

Однак, що стосується вмісту масової частки води, обидва види меду мають подібні значення 19,4 для гречаного меду та 18,2 для акацієвого меду. Це свідчить про те, що вони мають подібну вологість, що може впливати на їх тривалість зберігання та стабільність з процесі зберігання. Гречаний мед має показник рН рівний 3,8 тоді як акацієвий мед має значення 3,5.

Хоча мед має високу осмолярність та низьку активність води, його природність не гарантує повну відсутність мікроорганізмів. У процесі виробництва меду можуть бути присутні мікроорганізми, які походять з різних джерел, таких як пилок, пил, повітря, ґрунт та нектар. Це може бути спричинено мікробним забрудненням від осіб, зайнятих обробкою харчових продуктів, а також через контакт з обладнанням та перехресне забруднення під час збору врожаю та переробки в медогонках. Тому наступним етапом нашого дослідження було встановлення загальної кількості аероби та бактерій сальмонели в меді гречаному й акацієвому після збирання з метою встановлення загальної їх кількості.

Результати досліджень представлені в таблиці 1.

Таблиця 1

Загальна кількість аеробів та бактерій в гречаному та акацієвому меді

Вид меду	Аеробні мезофіли (КОУ/г)	Сальмонела (в 25 г)
Гречаний	5.5×10^3	Негативний
Акацієвий	5.1×10^3	Негативний

З отриманих результатів встановлено, що гречаний мед має кількість аеробів на рівні 5.5×10^3 КОУ/г, тоді як акацієвому меді він становив 5.1×10^3 КОУ/г. Що ж стосується показників бактерій сальмонела то вони взагалі були відсутні. Отримані показники свідчать про їхню придатність для споживання.

Аналіз органолептичних показників показав, що властивості меду є більш привабливими для

споживачів і визначити, які види меду можуть мати більшу цінність для споживачів. [14, с. 57].

Основою оцінки меду за допомогою органолептичних методів є опис і кількісна оцінка різних факторів, які відносяться до зорових, нюхових, смакових і тактильних властивостей. Крім того, органолептичний аналіз меду може надати інформацію про його ботанічне походження та виявлення можливих підробок. Цей процес також є важливим для поліпшення розуміння вимог, уподобань або неприйняття споживачів щодо оцінюваних медових продуктів [15, с. 112].

Результати досліджень з органолептичних показників гречаного та акацієвого меду наведені в таблиці 2.

Таблиця 2

Показники органолептичних показників меду різного походження

Найменування показника	Вид меду	
	Гречаний	акацієвий
Колір	темно-коричневий колір	Світло прозорий
Аромат	Присмно виражений	Слабо виражений
Смак	Без сторонніх присмаків	Без сторонніх присмаків, солодкий
Консистенція	В'язка	В'язка
Кристалізація	Присутня	Присутня

Отримані результати органолептичних показників гречаного та акацієвого меду показали різні характеристики цих видів меду. Гречаний мед має темно-коричневий колір, без сторонніх запахів, приємний аромат, приємний смак, в'язку консистенцію та присутню кристалізацію. Акацієвий мед має світло прозорий колір, слабо виражений аромат, без сторонніх присмаків, солодкий смак, в'язку консистенцію та присутню кристалізацію.

Висновки. Дослідження гречаного та акацієвого меду показало різницю у їх властивостях. Гречаний мед відрізняється вищим діастазним числом, що свідчить про більш значну активність ферменту діастази та його вищу якість. Акацієвий мед, у свою чергу, містить більше сахарози, що може впливати на його смакові характеристики та стійкість. Обидва види меду мають подібний вміст вологи та рівень рН.

Досліджуючи мікробіологічні показники меду встановлено, що кількість аеробних бактерій у гречаному меді становила 5.5×10^3 КОУ/г, тоді як у акацієвому меді ця кількість складала 5.1×10^3 КОУ/г. отримані результати свідчать про їхню високу якість та придатність для споживання.

Органолептичні показники гречаного та акацієвого меду вказують на відмінність між ними. Гречаний мед має темно-коричневий колір, приємний аромат, приємний смак, в'язку консистенцію та присутню кристалізацію, тоді як акацієвий мед має світло-прозорий колір, слабо виражений аромат, солодкий смак, в'язку консистенцію та присутню кристалізацію.

Список літератури:

1. Valdés-Silverio, L. A., Iturralde, G., García-Tenesaca, M., Paredes-Moreta, J., Narváez-Narváez, D. A., Rojas-Carrillo, M., ... & Alvarez-Suarez, J. M. Physicochemical parameters, chemical composition, antioxidant capacity, microbial contamination and antimicrobial activity of Eucalyptus honey from the Andean region of Ecuador. *Journal of Apicultural Research*, 2018. 57(3). 382-394c.
2. Migdał, W., Owczarczyk, H. B., Kędzia, B., Hołderna-Kędzia, E., & Madajczyk, D. Microbiological decontamination of natural honey by irradiation. *Radiation Physics and Chemistry*, 2000. 57(3-6). 285-288c.
3. Hosny, I. M., El-Ghani, S. A., & Nadir, A. S. Nutrient composition and microbiological quality of three unifloral honeys with emphasis on processing of honey probiotic yoghurt. *Global veterinaria*, 2009. 3(2). 107-112 c.
4. Fernández, L. A., Ghilardi, C., Hoffmann, B., Busso, C., & Gallez, L. M. Microbiological quality of honey from the Pampas Region (Argentina) throughout the extraction process. *Revista Argentina de microbiologia*, 2017. 49(1). 55-61c.
5. Мельник, О. П., Маринін, А. І., Шевченко, О. Ю., Літвинчук, С. І., & Святненко, Р. С. ВИКОРИСТАННЯ МЕТОДУ ЯМР-СПЕКТРОСКОПІЇ ДЛЯ ДОСЛІДЖЕННЯ ІДЕНТИФІКАЦІЇ ТА ФАЛЬСИФІКАЦІЇ МЕДУ. *Вісник ЛТЕУ. Технічні науки*, 2023. (34). 21-31c. DOI: <https://doi.org/10.32782/2522-1221-2023-34-03>
6. Grabowski, N. T., & Klein, G. Microbiology and foodborne pathogens in honey. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 2017. 57(9). 1852-1862c.
7. Olaitan PB, Adeleke OE, Ola IO. Honey: a reservoir for microorganisms and an inhibitory agent for microbes. *Afr Health Sci*.2007.159-165c.
8. Fernández, L. A., Ghilardi, C., Hoffmann, B., Busso, C., & Gallez, L. M. Microbiological quality of honey from the pampas region (argentina) throughout the extraction process. *Ryobiology*, 2017. 49(1). 69-72c. <https://doi.org/10.1016/j.ram.2016.05.010>

9. Snowdon, J. A., & Cliver, D. O. Microorganisms in honey. *International journal of food microbiology*, 1996. 31(1-3). 1-26 с.
10. Róžańska, H., & Osek, J. Effect of storage on microbiological quality of honey. *Journal of Veterinary Research*, 2012. 56(2), 161-163 с.
11. Мед натуральний. Технічні вимоги: ДСТУ 4497:2005. – [Чинний від 28-01-2005]. – К.: Держспоживстандарт України, 2007. 4 с. (Національні стандарти України).
12. Laaroussi, H., Bouddine, T., Bakour, M., Ousaaid, D., & Lyoussi, B. (2020). Physicochemical properties, mineral content, antioxidant activities, and microbiological quality of *Bupleurum spinosum* Gouan honey from the middle atlas in Morocco. *Journal of Food Quality*, 2020. 1-12 с.
13. Дон І. Петруша Ю. Фізико-хімічні показники якості різних сортів меду. Мистецтво наукової думки, 2019. Вип.7. 46-49 с.
14. Svyatnenko, R., Marynin, A., Litvynchuk, S., & Pasichnyi, V. Дослідження якості меду різних джерел ботанічного та одного регіонального походження. *НВ ЛНУ ветеринарної медицини та біотехнологій. Серія: Харчові технології*, 2023. 25(99). 56-60с. <https://doi.org/10.32718/nvlvet-f9910>
15. Маринін, А. І., Шевченко, О. Ю., & Позняк, О. М. Святненко Р. С. Фізико-хімічні та органолептичні показники меду різного ботанічного та одного регіонального походження. ВЧЕНІ ЗАПИСКИ ТАВРІЙСЬКОГО НАЦІОНАЛЬНОГО УНІВЕРСИТЕТУ ІМЕНІ В.І. ВЕРНАДСЬКОГО Серія: Технічні науки, 2023. Том 34 (73), 110-114 с. DOI: <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2023.3.2/19>

Svyatnenko R.S., Marynin A.I., Shevchenko O.Yu., Poznyak O.M., Litvynchuk S.I.
MICROBIOLOGICAL AND PHYSICO-CHEMICAL PROPERTIES OF BUCKWHEAT AND ACACIA HONEY

The quality of honey naturally varies depending on its geographical origin and the botanical source collected by the bees. These characteristics affect the appearance of honey, such as its light color and thickness; can affect the attractiveness of honey for consumers. The density of honey depends on its moisture content. The higher the moisture content of honey, the higher the risk of fermentation, so honey is usually processed before being sold. However, processing methods can change the nutritional content, original taste and physical characteristics of honey.

The article is devoted to the study of microbiological and physicochemical parameters of honey of different regional origin. It was established that buckwheat honey has a diastase number (18.8 Goethe units) and acacia honey has a diastase number (7.2 Goethe units). An increased diastase number of honey indicates a greater activity of the diastase enzyme, which can be an indicator of its higher quality and more of natural origin.

It was also found that acacia honey contains more sucrose (3.4%) than buckwheat honey (1.5%), which may affect their taste characteristics and stability. Analysis of indicators of the mass fraction of water indicate close indicators: buckwheat honey – 19.4%, acacia honey – 18.2%. The results of the study of the pH indicator indicate a slight difference in the indicators.

During the analysis of microbiological indicators of honey, it was established that buckwheat honey had the presence of aerobic bacteria at the level of 5.5×10^3 CFU/g, while in acacia honey this amount was 5.1×10^3 CFU/g.

On the basis of organoleptic indicators, it was established that buckwheat honey has a dark brown color, a pleasant aroma, a pleasant taste, a viscous consistency and the presence of crystallization, while acacia honey has a light transparent color, a weak aroma, a sweet taste, a viscous consistency and present crystallization.

The obtained results of the honey study testify to the compliance of the quality indicators of the product with the requirements of DSTU 4497:2005 "Natural honey. Technical requirements".

Key words: honey, organoleptic indicators, physico-chemical indicators, microbiological indicators, botanical origin of honey.

ТРАНСПОРТ

УДК 656.025.4

DOI <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2023.5/55>**Войцеховський В.С.**

Національний авіаційний університет

Борець І.В.

Національний авіаційний університет

Валько А.М.

Національний авіаційний університет

Габрієлова Т.Ю.

Національний авіаційний університет

КОМПЛЕКСНА СИСТЕМА ОЦІНЮВАННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ УПРАВЛІННЯ ВАНТАЖОПОТОКАМИ АВІАКОМПАНІЙ

У статті відзначено значну актуальність вантажної складової для пасажирських авіаперевізників. Наголошено на необхідності подальшого підвищення ефективності управління вантажопотоком саме для регулярних мережеских авіакомпаній, в тому числі і через раціоналізацію використання власних перевізних ємностей та ємностей авіакомпаній-партнерів на дефіцитних маршрутах.

В результаті проведеного критичного аналізу наукових джерел охарактеризовано ряд досліджень щодо вирішення проблеми управління вантажопотоками на транспорті, а також праці як стосуються розвитку авіаційного ринку, в тому числі щодо інформаційного обслуговування вантажних авіаперевезень та моделювання планування вантажопотоків. Не було виявлено комплексного вирішення задачі оцінювання ефективності управління вантажопотоками авіакомпаній.

Нами були визначені передумови щодо розробки комплексної системи оцінювання ефективності управління вантажопотоками авіакомпаній, яка повинна включити у себе різні інструменти та засоби.

Сформовано систему вирішення завдань у рамках управління вантажопотоками авіакомпаній в умовах невизначеності, на основі принципів системності, збалансованості та різномірності управління. Розроблено схему критеріально-факторного впливу щодо здійснення вибору вантажного завантаження авіакомпанією шляхом балансування вантажопотоків. Запропонована принципова схема щодо реалізації нових можливостей для збільшення вантажопотоків авіакомпаній в умовах глобалізаційних змін та невизначеності, що дає можливість підвищити ефективність у виборі з-поміж альтернативних варіантів.

Подальші наукові дослідження повинні стосуватися реалізації подібних інструментів для всіх учасників процесу міжнародної доставки вантажів за участю авіаційного виду транспорту – логістичних операторів, аеропортів, хендлінгових компаній тощо.

Ключові слова: авіакомпанія, вантажопотік, ефективність, оцінювання, система, невизначеність.

Постановка проблеми. Доставка вантажів авіаційним транспортом останнім часом набуває все більшої актуальності. При чому вантажний бізнес, який раніше для пасажирських перевізників вважався другорядним нині стає складовою успішності авіакомпанії в умовах глобалізованого конкурентного середовища. Посилюється проблема підвищення ефективності управління вантажопотоком саме для регулярних мережеских авіакомпаній у площині дохідності та раціоналі-

зації використання власних перевізних ємностей та вибудовування ефективної взаємодії обміну вантажними ємностями із іншими авіакомпаніями на дефіцитних маршрутах. Одним із ключових інструментів вирішення цієї проблеми стає якісне планування та прогнозування на основі масивів власних даних, аналізі конкурентного середовища, ринкової оцінки аналітиків авіаційної сфери як у регіональному та субрегіональному, так і в маршрутному розрізі.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Значний внесок у дослідження проблеми управління вантажопотоками на транспорті серед вітчизняних науковців внесли О. П. Кіркін, М. Б. Копитчук, О. В. Олещук, О. В. Павленко, Н. В. Пономарьова та ін. Зокрема О. Кіркіним у [1] запропоновано інструменти щодо керування нерегулярними промисловими вантажопотоками у віртуальному центрі, що робить цю роботу піонерською у цій царині. У роботі [2, с. 6–12] М. Копитчуком було обґрунтовано необхідність побудови ієрархічно інтегрованих систем обліку вантажопотоків із формуванням відповідних моделей, методів та алгоритмів. Особливо актуальною на той час стала ідея автоматизованого обліку вантажопотоків в реальному масштабі часу та використання інформаційних рішень щодо формування атрибутивно-ситуаційної компоненти інформаційного опису процесу транспортування вантажів.

В рамках [3] було запропоновано комплекс теоретико-практичних засобів вирішення проблеми автоматизації системи обліку вантажопотоків. Реалізована у [4] модель функціонування логістичних ланцюгів транспортного вузла для вибору інтенсивних технологій вантажоруху надала можливість врахувати інтереси всіх учасників перевізного процесу на основі досягнення розумного компромісу. У роботі [5] Н. В. Пономарьова приходить до правильного висновку щодо необхідності врахування параметрів транспортного процесу та оцінки вірогідності затримки руху транспортних засобів з метою визначення раціональні схеми перевезень вантажів у міжнародному сполученні на основі математичного інструментарію доставки вантажів у міжнародному сполученні наземними видами транспорту.

Впровадженню інноваційних послуг у діяльність підприємств повітряного транспорту в тому числі і у аспектах управління вантажопотоками присвячено дослідження Н. В. Рунчевої, С. О. Гричаного, О. В. Новікової [6]. Слід погодитися із твердженням авторів щодо ключового значення інновацій як основи формуванню нових конкурентних переваг авіапідприємств. Одним із ключових аспектів успішного розвитку країни є створення хаб-центрів, що має на меті збільшення транзитного і трансферного пасажиро- і вантажопотоків [7]. Проведений у [8] В. Л. Петрик аналіз стану світового ринку цивільної авіації та прогноз його розвитку в умовах нестабільного попиту на авіаперевезення дозволив стверджувати, що вантажні авіаційні перевезення стикаються із цілою низкою проблем, які необхідно вирішувати на

основі якісного планування та прогнозування. Шляхом аналізу діючих вантажопотоків та розробці схем оптимальної маршрутизації, експедитор гармонізує відносини між учасниками транспортного процесу в ланцюгах поставок [9]. Проблеми інформатизації та модель планування вантажопотоків у авіаційній сфері також мають вагоме значення і досліджувалися у [10; 11].

Серед іноземних дослідників проблем управління авіаційними вантажопотоками слід особливо відзначити дослідження класиків авіаційної сфери, таких як Н. Ашфорд, С. Мумаїз, П. Райт та М. Ньюман. У [12, с. 457–458] відзначено нерівномірність вантажопотоку, що обслуговується аеропортами, із зосередженням на хаби, а також непропорційність змін щодо пасажиропотоків. Як відзначається у [13; 14], важливо розуміти, що система аеропортів-хабів охоплює виключно основні торговельні шляхи і чимало районів в неї не входять.

Незважаючи на значимість проблеми, за результатами проведеного критичного аналізу попередніх наукових досліджень, нами не було виявлено комплексної системи оцінювання ефективності управління вантажопотоками авіакомпаній.

Метою статті є визначення передумов щодо розробки комплексної системи оцінювання ефективності управління вантажопотоками авіакомпаній.

Виклад основного матеріалу. Системність задачі управління вантажопотоком для регулярного авіаперевізника, який діє на мережі визначається: необхідністю сполучення вільного тоннажу власних перевізних ємностей; вільного тоннажу компаній-партнерів, який був завчасно придбаний у них; вільного тоннажу на ринку, який можливо залучити в режимі реального часу. Більше того, авіаційний перевізник повинен завжди будувати систему щодо балансування власних пасажирських та вантажних ємностей, а також взаємозв'язків із аеропортами, вантажними агентами, логістичними операторами, експедиторами, хендліновими компаніями щодо обслуговування залученого вантажопотоку.

Нами було сформовано систему щодо вирішення завдань у рамках управління вантажопотоками авіакомпанії в умовах невизначеності на основі принципів системності, збалансованості та різнорівневості управління (рис. 1). Ця система включає в себе математичну складову, інформаційне наповнення, має трирівневий принцип формування та передбачає загалом системність та глобалізованість процесу управління вантажопотоками авіакомпанії. Загалом процесу продажу

вантажних ємностей авіакомпанією носить ймовірнісний характер та загалом можна розглядати як частково випадковий процес. Слід враховувати, що формування вантажної стратегії авіакомпанією безумовно перетинається із загальною стратегією перевізника та стратегією щодо пасажирських перевезень. І цілком очевидно, що останні дві будуть домінувати над вантажною з точки зору пріоритетності. З іншого боку саме вантажна складова повинна стати локомотивом розвитку авіакомпанії із формуванням додаткової конкурентної переваги. Результати продажів вантажних ємностей формують фактичний вантажопотік авіакомпанії, який і перевозиться безпосередньо на мережі авіаліній. Побудовування схеми роботи

авіакомпанії із партнерами – аеропортами, вантажними агентами, логістичними операторами, експедиторами, хендліновими компаніями щодо обслуговування залученого вантажопотоку є вкрай важливою обставиною. Як і формування інформаційного забезпечення щодо оптимізації процесу доставки вантажів авіакомпанією.

Динамічний принцип ціноутворення при продажі вантажних ємностей повинен бути пріоритетним. Серйозні можливості для авіакомпанії може становити активізація раннього продажу ємностей. Причому це актуально при реалізації, як вантажних, так і для пасажирських ємностей. Більшість перевізників нехтує важливістю довжини грошей, а це є одним із наріжних каме-

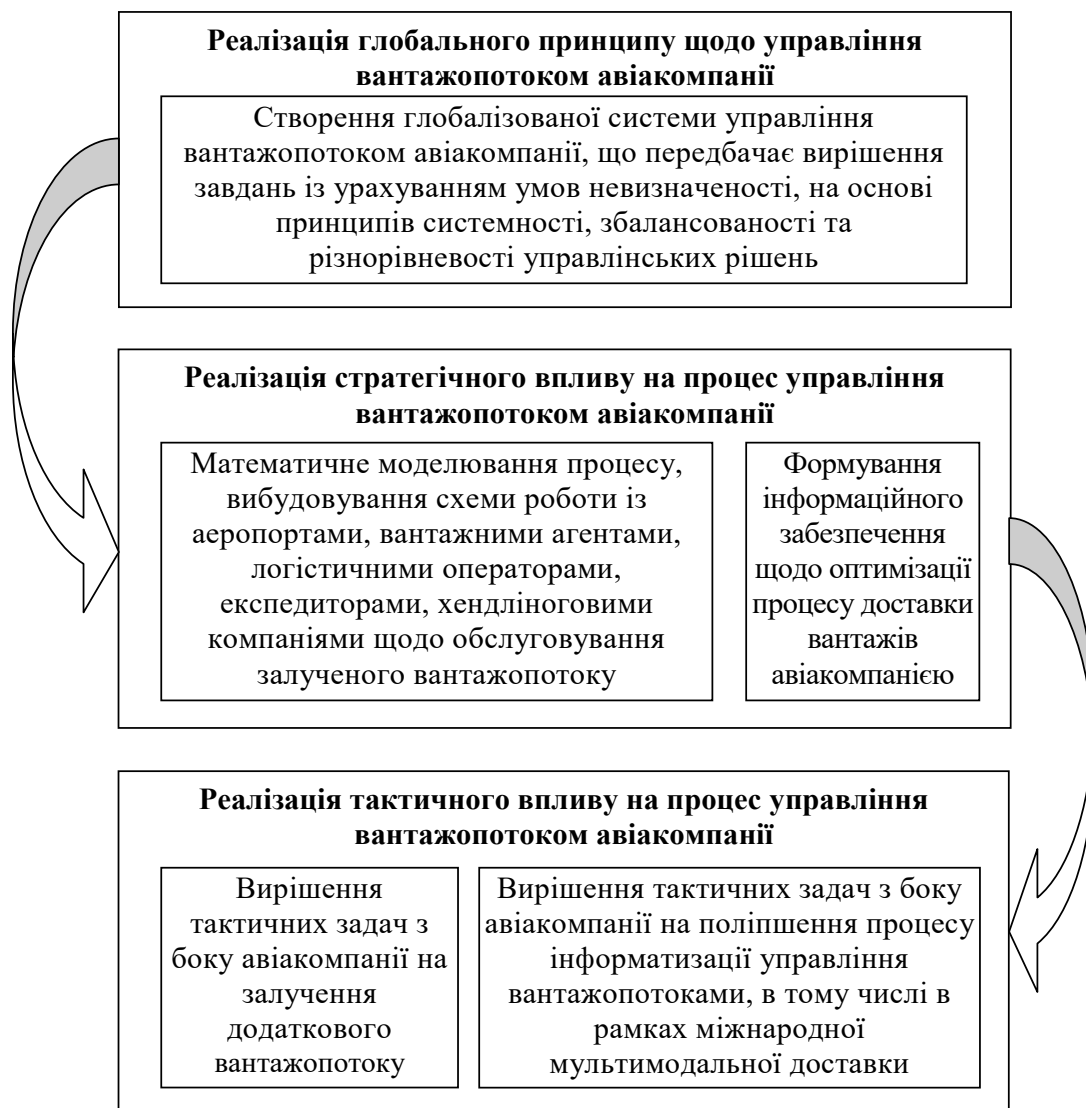


Рис. 1. Система щодо вирішення завдань у рамках управління вантажопотоками авіакомпанії в умовах невизначеності на основі принципів системності, збалансованості та рівності управління

нів успіху у такому високооборотному та низько-прибутковому бізнесі, як авіаційний.

Саме авіаперевізника слід вважати головним генератором вантажних потоків. І саме авіакомпанія повинна створювати можливості для ефективного управління ним, залучаючи для обслуговування власного вантажопотоку на авіаційному сегменті інших учасників. В той же час в рамках мультимодальної доставки вантажів головним її організатором буде логістичний оператор чи експедитор.

Авіакомпанія має активно управляти вантажопотоками через ефективну систему продажів та відкриваючи продаж на вільні вантажні ємності на певному напрямку на певний рейс, таким чином спрямовуючи вантажопотік по власній мережі. Може виникнути потреба перерозподілу вантажопотоку між різними напрямками та лініями авіакомпанії чи виникне необхідність залучення вантажопотоку авіакомпанії-партнера або навпаки вимагатиметься віддати їй частину власного вантажопотоку від надлишку або для вибудовування більш складного ланцюга доставки.

Найбільш дієва система управління завантаженням для авіаперевізника робить оптимальний вибір за критеріями використання вантажної

ємності та максимізації дохідності. Відмінність цієї системи полягає у комплексності, оскільки розглядається загалом дохідність не окремого рейсу, а усієї мережі авіакомпанії в цілому. З точки зору вибудовування тарифу враховується мильний принцип при врахуванні ємності на декількох маршрутах з метою оптимізації дохідності, а також забезпечення оптимального завантаження за всіма вільними ємностями на мережі маршрутів авіаперевізника, а також авіакомпаній-партнерів. Також слід пам'ятати, що для авіакомпанії важливим стане загальний принцип корисності вантажу для власної мережі повітряних ліній, а не лише рівень дохідності. Схема критеріально-факторного впливу щодо здійснення вибору вантажного завантаження авіакомпанією шляхом балансування вантажопотоків представлена на рис. 2.

При критеріально-факторному впливі щодо здійснення вибору вантажного завантаження авіакомпанією враховується фактор часу, невизначеності, складності обслуговування, наявності вільних ємностей у річному вимірі, а також фактор відсутності права на обслуговування тих чи інших категорій вантажів. В процесах управління вантажопотоками важливо здійснити їх балансування та утримання на мережі із використанням логістичних



Рис. 2. Схема критеріально-факторного впливу щодо здійснення вибору вантажного завантаження авіакомпанією шляхом балансування вантажопотоків

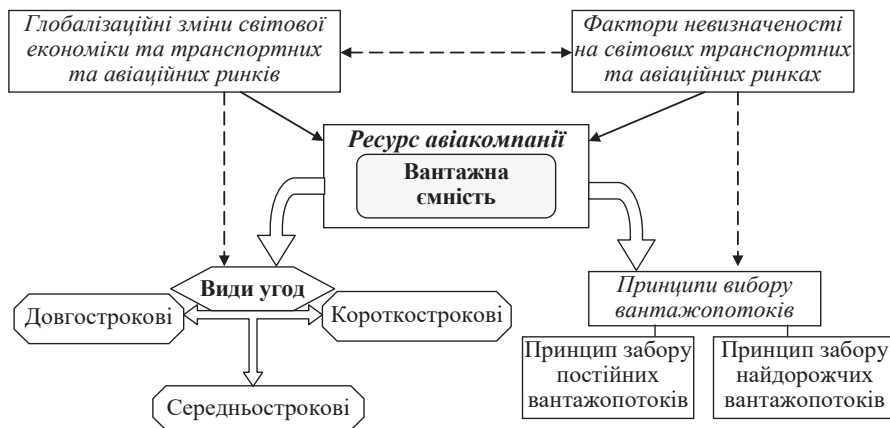


Рис. 3. Принципова схема щодо реалізації нових можливостей для збільшення вантажопотоків авіакомпаній в умовах глобалізаційних змін та невизначеності

підходів. Сезонний чинник теж є дуже важливим, оскільки регулярні авіаперевезення мають тенденцію до сезонних змін. Суттєві можливості вантажних авіаперевезень визначаються тим, що попит на них на більшості маршрутів протилежний попиту на пасажирські перевезення, а отже у низький сезон для пасажирів авіакомпанія може заповнювати вільні ємності вантажами. Авіакомпанія може продавати свої ємності шляхом використання різних інструментів. Може пропонувати викупити блок тоннажу чи вантажних місць на окремі дні, тиждень, місяць, на частину сезону, на сезон, квартал або на рік за тим чи іншим маршрутом. Це може відбуватися через відкриті системи продажу, через особисте спілкування, за наслідком партнерських контрактів, маркетингових угод, альянсової взаємодії та ін.

На рис. 3 представлено принципову схему щодо реалізації нових можливостей для збільшення вантажопотоків авіакомпаній в умовах глобалізаційних змін та невизначеності.

Ресурс обсягу вантажної ємності є обмеженим та про це завжди треба пам'ятати. У пріоритеті повинні бути найдорожчі, найефективніші та постійні вантажопотоки. Хоча вантаж повністю позбавлений самостійності, проте вантажовласники та логістичні оператори можуть переорієнтувати вантажні потоки у разі потреби, про це

завжди треба пам'ятати, а отже вантажопотоки, як і пасажиропотоки, теж мають певний рівень спонтанності та невизначеності при умові вже досягнутому початковому балансі.

Висновки. За результатами проведеного дослідження щодо визначення передумов розробки комплексної системи оцінювання ефективності управління вантажопотоками авіакомпанії було сформовано систему вирішення завдань у рамках управління вантажопотоками авіакомпанії в умовах невизначеності, схему критеріально-факторного впливу щодо здійснення вибору вантажного завантаження авіакомпанією шляхом балансування вантажопотоків, а також принципову схему щодо реалізації нових можливостей для збільшення вантажопотоків авіакомпанії в умовах глобалізаційних змін та невизначеності. Відзначено, що означені інструменти дозволяють перейти до оцінки у ефективності управління вантажопотоками авіакомпанії за комплексним принципом.

В сучасних умовах перерозподіл вантажопотоків є важливою складовою управління його ефективністю. Це може бути реалізовано у вигляді залучення додаткового вантажопотоку, його віддання, вибудовування більш складного ланцюга доставки, за участю аеропортів, логістичних операторів, інших авіаперевізників.

Список літератури:

1. Кіркін О. П. Удосконалення технології нерегулярних промислових вантажопотоків з використанням методів віртуального підприємства: автореф. дис... канд. техн. наук: 05.22.12. Луганськ, 2007. 20 с.
2. Копитчук М. Б. Теоретичні основи побудови і засоби практичної реалізації інтегрованих інформаційних систем обліку вантажопотоків: дис... д-ра техн. наук: 05.13.06. Одеса, 2003. 308 с.
3. Олещук О. В. Аналітичні та інформаційні моделі і методи ідентифікації рухомих об'єктів для систем управління вантажопотоками: дис... канд. техн. наук: 05.13.06. Одеса, 2007. 159 с.

4. Павленко О. В. Розробка моделі функціонування логістичних ланцюгів транспортного вузла для вибору інтенсивних технологій вантажоруху: автореф. дис... канд. техн. наук: 05.22.01. Харків, 2004. 20 с.
5. Пономарьова Н. В. Прогнозування вантажопотоків на наземних видах транспорту у міжнародному сполученні : автореф. дис... канд. техн. наук: 05.22.01. Харків, 2007. 20 с.
6. Рунчева Н. В., Гричаний С. О., Новікова О. В. Впровадження інноваційних послуг у діяльність підприємств повітряного транспорту. *Вісник Бердянського університету менеджменту і бізнесу*. 2018. № 3(43). С. 76–80.
7. Кузьменко Л. Г. Регулювання діяльності аеропортів: світовий досвід. *Актуальні проблеми міжнародних відносин*. 2014. Вип. 121(2). С. 209-226.
8. Петрик В. Л. Аналіз стану світового ринку цивільної авіації та прогноз його розвитку в умовах нестабільного попиту на авіаперевезення. *Бізнес Інформ*. 2020. №3. С. 112–119.
9. Зіміна А.І. Логістичні аспекти транспортно-експедиційного обслуговування вантажоперевезень. *Бізнес Інформ*. 2017. № 4. С.112-124
10. Войцеховський В. С., Габрієлова Т. Ю. Вплив інформатизації на процеси доставки вантажів за участю авіаційного транспорту. *Наукоємні технології: науковий журнал*. Київ, 2013. № 3. С. 327–330.
11. Войцеховський В. С. Модель планування перевезення вантажів на мережі авіаліній перевізника. *Вісник Кременчуцького національного університету імені Михайла Остроградського*. Кременчук, 2017. Вип. 4(105). С. 50–55.
12. Ashford N. J., Mumayiz S., Wright P. H. Airport engineering: planning, design, and development of 21st century airport. New York: Wiley & Sons, 2011. 753 p.
13. Newman M.E.J.; Barabási A.–L.; Watts D. J. The Structure and Dynamics of Networks. Princeton: Princeton University Press, 2006. 592 p.
14. Newman, M.E.J. Networks – An Introduction, Oxford: Oxford University Press, 2010. 784 p.

Voitsehovskiy V.S., Borets I.V., Valko A.M., Gabrielova T.Yu. COMPREHENSIVE SYSTEM FOR ASSESSING THE EFFECTIVENESS OF AIRLINE CARGO FLOW MANAGEMENT

The article notes the significant relevance of the cargo component for passenger air carriers. The necessity of further improving the effectiveness of cargo flow management for regular network airlines was emphasised, including through the rationalisation of the use of their own transportation capacities and the ones of partner airlines on deficit routes. As a result of the critical analysis of scientific sources, a number of studies on solving the problem of cargo flow management in transport, as well as works related to the aviation market development, in particular; information support for air cargo transportation and modelling of cargo flow planning, were characterised. A comprehensive solution to the problem of assessing the effectiveness of airline cargo flow management has not been identified.

The prerequisites for the development of a comprehensive system for assessing the effectiveness of airline cargo flow management, including various tools and means, were identified.. A system for solving tasks within the framework of airline cargo flow management under conditions of uncertainty was formed on the basis of the principles of systemic, balanced and multi-level management. A scheme of criterion-factor influence on the choice of cargo loading by an airline through balancing cargo flows was developed. A fundamental scheme for the implementation of new opportunities to increase the airline's cargo flows in the context of globalisation changes and uncertainty was proposed, which makes it possible to increase the effectiveness in choosing among alternative options.

Further scientific studies should focus on the implementation of similar tools for all participants in the process of international cargo delivery involving air transport – logistics operators, airports, handling companies, etc.

Key words: *airline, cargo flow, effectiveness, assessment, system, uncertainty.*

УДК 656.6

DOI <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2023.5/56>**Кириллова О.В.**

Одеський національний морський університет

Кириллова В.Ю.

Одеський національний морський університет

АКТУАЛІЗАЦІЯ ПРОБЛЕМИ ПРОФЕСІЙНОЇ ПІДГОТОВКИ КАДРІВ ДЛЯ ТРАНСПОРТНОЇ ГАЛУЗІ УКРАЇНИ ЧЕРЕЗ ПРИЗМУ НОВОГО ПЕРЕЛІКУ ГАЛУЗЕЙ ЗНАНЬ І СПЕЦІАЛЬНОСТЕЙ, ЗА ЯКИМИ ЗДІЙСНЮЄТЬСЯ ПІДГОТОВКА ЗДОБУВАЧІВ ВИЩОЇ ОСВІТИ

У статті досліджено питання щодо запропонованого і розміщеного на сайті МОН України проекту постанови Кабінету Міністрів України (КМУ) «Про затвердження переліку галузей знань і спеціальностей, за якими здійснюється підготовка здобувачів вищої та фахової передвищої освіти». Створення цього документу пов'язано з необхідністю гармонізації і забезпечення порівнянності державної статистики із такими міжнародними стандартами та рекомендаціями, як міжнародні стандартні системи класифікації ООН. Проте встановлено, що всі зміни у частині транспортних спеціальностей нового Переліку представляються змістовно не обґрунтованими і такими, що суперечать Законам України «Про вищу освіту», «Про транспорт», Господарському кодексу України, Міжнародній стандартній господарській класифікації усіх видів економічної діяльності, Національному класифікатору України та Класифікації видів економічної діяльності України.

Виявлено, що у новому Переліку взагалі відсутня галузь знань «Транспорт» і спеціальність «Транспортні технології (за видами)», а всі інші суто інженерні транспортні спеціальності перенесені в нову галузь знань «Сервіси» разом з такими спеціальностями, як «Послуги краси», «Готельно-ресторанна справа та громадське харчування», «Фізична культура і спорт», «Подорожі, туризм та рекреація», «Громадське здоров'я та охорона праці». При цьому, очевидно, що немає ніякої спорідненості між наведеними видами сервісів і транспортом.

Показано, що для забезпечення порівнянності державної статистики із Міжнародною стандартною класифікацією освіти (МСКО), не обов'язково кардинально змінювати національний перелік спеціальностей, знищуючи стратегічно важливі та визнані галузі знань і спеціальності, зокрема галузь знань «Транспорт» і спеціальність «Транспортні технології (за видами)». Для цього при наданні інформації щодо державної статистики у її порівнянні з міжнародними стандартами достатньо використовувати вже встановлену національним законодавством відповідність між наявними в Україні транспортними спеціальностями та переліком спеціальностей МСКО, яка визначена у Постанові КМУ від 29 квітня 2015 р. № 266 «Про затвердження переліку галузей знань і спеціальностей, за якими здійснюється підготовка здобувачів вищої освіти».

Сформульовано об'єктивні застереження і можливі наслідки затвердження нового Переліку, які, перш за все, пов'язані зі зникненням основи освітнього та наукового потенціалу транспортної галузі, фундаменту для її подальшого розвитку і вдосконалення, а також джерела підготовки професійних кадрів для транспортної галузі України.

Ключові слова: транспорт, транспортні технології, галузь знань, спеціальність, новий перелік галузей знань і спеціальностей.

Постановка проблеми. На офіційному сайті МОН України 08 серпня 2023 р. був розміщений для громадського обговорення проект нового переліку галузей знань і спеціальностей, за якими здійснюється підготовка здобувачів вищої та фахової передвищої освіти (далі – «Перелік») [1].

За інформацією, наведеною на офіційному сайті МОН України, створення нового Переліку

здійснюється з метою «гармонізації і забезпечення порівнянності державної статистики із такими міжнародними стандартами та рекомендаціями, як міжнародні стандартні системи класифікації ООН» [1].

Проте документ викликав багато питань і велику стурбованість з боку представників професійної транспортної освіти і науки. Головне занепокоєння

викликала відсутність у новому Переліку галузі знань «Транспорт» [2], яка є стратегічно важливою для будь-якої країни. Висловлювалися думки про те, що це технічна помилка. Оскільки, дійсно, при наявності та законодавчої визначеності «Транспорту», як сфери матеріального виробництва і самостійної галузі економіки, представляється недоречним і нелогічним виключення із нового Переліку відповідної галузі знань «Транспорт».

Необґрунтованим, на наш погляд, також виглядає і перенесення всіх суто інженерних транспортних спеціальностей («Морський та внутрішній водний транспорт», «Авіаційний транспорт», «Залізничний транспорт», «Автомобільний транспорт») до галузі знань «Сервіси» всупереч Закону України «Про вищу освіту» [3, ст. 1, п. 8]. Нашу позицію підтверджує той факт, що немає ніякої спорідненості між транспортом і тими видами сервісів (К1-К5), що містяться у новому Переліку (К1 «Послуги краси», К2 «Готельно-ресторанна справа та громадське харчування», К3 «Фізична культура і спорт», К4 «Подорожі, туризм та рекреація», К5 «Громадське здоров'я та охорона праці»). Відсутні спільні виробничі одиниці, які здійснюють однакові чи подібні види економічної діяльності відповідно до Господарського кодексу України [4, ст. 260]. Немає спільного і між предметами (засобами) та об'єктами праці, предметами вивчення та дослідження, що також підтверджує факт відсутності ознак і критеріїв спорідненості між спеціальностями, що включені до галузі знань «Сервіси» нового Переліку відповідно до Закону України «Про вищу освіту» [3, ст. 1, п. 8]. Крім того, виявляється не зрозумілим, як Держава у майбутньому відповідно до чинного Законодавства, зокрема Закону України «Про транспорт» [5, ст. 1] та у контексті впровадження євроінтеграційного курсу, зможе забезпечити «розвиток і вдосконалення транспорту» при наявності Міністерства інфраструктури, але при відсутності відповідної галузі знань «Транспорт». Очевидно, що видалення із нового Переліку галузі знань «Транспорт» призведе до актуалізації низки проблем, пов'язаних, перш за все, зі зникненням основи освітнього та наукового потенціалу транспортної галузі, фундаменту для її подальшого розвитку і вдосконалення, а також джерела підготовки відповідних кадрів для транспортної галузі України.

Аналіз джерел, зокрема нормативно-правових. У запропонованому новому Переліку галузей знань і спеціальностей [2], крім наведеного вище, також привертає увагу і наступне:

1. Відсутня у якості самостійної спеціальності «Транспортні технології (за видами)», яка сьогодні є єдиною в країні, що забезпечує підготовку фахівців-транспортників (раніше інженерів з транспорту) для роботи на підприємствах транспортної галузі, у різних сферах транспортного бізнесу і логістики. Випускники цієї спеціальності зараз, під час війни, займаються транспортним забезпеченням військової та цивільної інфраструктури нашої країни, працюючи на транспортних підприємствах різного профілю та різних форм власності, в органах державного управління транспортом, у транспортних відділах муніципальних установ тощо.

2. У новій спеціальності К6 «Морський та внутрішній водний транспорт», об'єднуються такі змістовно самостійні спеціальності, як:

– спеціальність 271 «Морський та внутрішній водний транспорт», яка регулюється національним [6] та міжнародним [7] законодавствами, і передбачає три спеціалізації: 271.01 «Навігація і управління морськими суднами»; 271.02 «Управління судновими технічними системами і комплексами»; 271.03 «Експлуатація судового електрообладнання і засобів автоматики»;

– спеціальність 275 «Транспортні технології (за видами)» у частині спеціалізації 275.01 «Транспортні технології (на морському та річковому транспорті)», яка регулюється національним законодавством [6].

При цьому нова спеціальність К6 «Морський та внутрішній водний транспорт» співвідноситься лише зі спеціальністю 1041 «Transport service» [2] Міжнародної стандартної класифікації освіти (МСКО) [8], що по суті змістовно відповідає лише спеціальності 275 «Транспортні технології (за видами)» [9] і таким спеціалізаціям, як 275.01 «Транспортні технології (на морському та річковому транспорті)» та 271.01 «Навігація і управління морськими суднами».

На наш погляд, всі перелічені вище зміни у новому Переліку представляються змістовно не обґрунтованими і таким, що:

– суперечать Законам України «Про вищу освіту» [3, ст. 1, п. 8], «Про транспорт» [5, ст. 1], Господарському кодексу України [4, ст. 260], Міжнародній стандартній господарській класифікації усіх видів економічної діяльності [10]; Національному класифікатору України і Класифікації видів економічної діяльності України [11];

– не відповідають Національній транспортній стратегії України на період до 2030 року [12];

– не враховують інтереси нашої країни, яка має наміри вступити до Європейського Союзу (ЄС),

що в контексті євроінтеграційного курсу та імплементації Угоди про асоціацію між Україною та ЄС [13] передбачає інтеграцію національної транспортної системи у транс'європейську мережу транспортних комунікацій, а це не можливо без фахівців-транспортників, які здатні вирішувати надскладні сучасні задачі у сфері транспорту;

- перекреслюють весь позитивний досвід, накопичений вітчизняною транспортною освітою, наукою та практикою;

- знищують налагоджену систему професійної підготовки здобувачів вищої та фахової передвищої освіти для роботи на різних підприємствах транспортної галузі України;

- руйнують освітній потенціал та науково-теоретичний фундамент для подальшого післявоєнного відродження, розвитку та вдосконалення транспорту (транспортної інфраструктури).

Метою статті є дослідження суперечливих і дискусійних питань щодо запропонованого і розміщеного на сайті МОН України проекту постанови Кабінету Міністрів України (КМУ) «Про затвердження переліку галузей знань і спеціальностей, за якими здійснюється підготовка здобувачів вищої та фахової передвищої освіти».

Для досягнення мети в роботі сформульовані та вирішені наступні завдання:

- виявлено факти, що суперечать чинному законодавству і стосуються галузі знань «Транспорт» та її структурних елементів – транспортних спеціальностей;

- сформульовано застереження та встановлено можливі наслідки затвердження нового Переліку для подальшого функціонування, розвитку і вдосконалення транспортної галузі під час війни та після її завершення;

- зроблено висновки і надано пропозиції щодо подолання суперечливих і дискусійних питань стосовно нового Переліку галузей знань і спеціальностей, за якими здійснюється підготовка здобувачів вищої та фахової передвищої освіти.

Виклад основного матеріалу дослідження. Розуміючи важливість документу [2], який був створений для «гармонізації» [1] державної статистики із міжнародними стандартами, вважаємо доцільним дослідити це питання з точки зору збалансованості між користю передбаченого, але не дуже своєчасного під час війни реформування і шкодою, що може завдати ухвалення цього документу транспортній освіті, науці та практиці.

1. Вважаємо, що така «гармонізація» в цілому призведе до тривалого «хаосу» у сфері національної транспортної освіти і науки, а також до втрати

унікальності створених і вже впроваджених освітніх програм, які в результаті такого реформування підлягатимуть повному перегляду з метою їхньої стандартизації в рамках нової галузі знань і об'єднаних спеціальностей. Крім того, така «гармонізація» призведе до необхідності перегляду всього методичного забезпечення діючих освітніх програм, чинних Стандартів вищої освіти, Професійних стандартів, Програм Єдиних державних кваліфікаційних іспитів (ЄДКІ), відповідних Специфікацій і тестових завдань ЄДКІ, а також взагалі до знищення налагодженої системи підготовки фахівців, зокрема за регульованими МОН України спеціальностями, якими є всі транспортні спеціальності, крім 274 «Автомобільний транспорт» [6].

На наш погляд, для «забезпечення порівняльності державної статистики» із Міжнародною стандартною класифікацією освіти (МСКО) [8], не обов'язково кардинально змінювати національний перелік спеціальностей, знищуючи стратегічно важливі та визнані галузі знань і спеціальності, зокрема галузь знань «Транспорт» і спеціальність «Транспортні технології (за видами)». Для цього при наданні інформації щодо державної статистики у її порівнянні з міжнародними стандартами достатньо використовувати вже встановлену національним законодавством відповідність між наявними в Україні транспортними спеціальностями та переліком спеціальностей МСКО, яка визначена у Постанові Кабінету Міністрів України від 29 квітня 2015 р. № 266 «Про затвердження переліку галузей знань і спеціальностей, за якими здійснюється підготовка здобувачів вищої освіти» (табл. 1) [9]. Тим більше, що відповідність між галузями знань і спеціальностями у проекті нового Переліку також не є строгою і однозначною. Навпаки, є розбіжності та невідповідності у порівнянні з галузями знань і спеціальностями, наведеними у МСКО. Наприклад, у МСКО [8] передбачено 10 галузей знань, а у запропонованому національному Переліку – 11 [2]. Крім того, присутні позиції, за якими одній спеціальності з переліку МСКО відповідають декілька спеціальностей із нового Переліку або навпаки. Це також передбачено й у вищевказаній Постанові КМУ № 266 з останніми змінами, внесеними 16.12.2022 р. (табл. 1) [9].

2. Необґрунтованими також представляються пропозиції щодо повного виключення із нового Переліку такої галузі знань, як «Транспорт», та включення всієї сукупності транспортних спеціальностей до галузі знань «Сервіси».

Відповідність галузі знань «Транспорт» і спеціальностей, які входять до її складу, Міжнародній класифікації освіти [8] відповідно до Постанови КМУ «Про затвердження переліку галузей знань і спеціальностей, за якими здійснюється підготовка здобувачів вищої освіти» [9]

Шифр і найменування галузі знань	Код і найменування спеціальності	Код і найменування відповідної деталізованої галузі за Міжнародною стандартною класифікацією освіти
27 Транспорт	271 Морський та внутрішній водний транспорт	0716 Motor vehicles, ships and aircraft
		1041 Transport services
	272 Авіаційний транспорт	0716 Motor vehicles, ships and aircraft
		1041 Transport services
	273 Залізничний транспорт	0716 Motor vehicles, ships and aircraft
		0732 Building and civil engineering
		1041 Transport services
	274 Автомобільний транспорт	0716 Motor vehicles, ships and aircraft
		1041 Transport services
	275 Транспортні технології (за видами)	1041 Transport services

Це змістовно суперечить чинному законодавству і порушує існуючу гармонізацію з ним. Наприклад:

а) Відповідно до Закону України «Про транспорт» [5, ст. 1] «*транспорт є однією з найважливіших галузей суспільного виробництва і покликаний задовольняти потреби населення та суспільного виробництва в перевезеннях*». «*Розвиток і вдосконалення транспорту здійснюється відповідно до державних цільових програм з урахуванням його пріоритету та на основі досягнень науково-технічного прогресу і забезпечується державою*». Транспорт має стратегічно важливе значення для забезпечення обороноздатності будь-якої країни, для транспортного забезпечення потреб різних секторів економіки та цивільного населення в перевезеннях.

б) У Господарському кодексі України [4, ст. 260] і у вітчизняних статистичних класифікаціях термін «галузь» визначено як «*1. Сукупність усіх виробничих одиниць, які здійснюють переважно однакові чи подібні види економічної діяльності*». «*п.3. Вимоги до класифікації галузей економіки встановлюються законом*».

в) Відповідно до Міжнародної стандартної господарської класифікації усіх видів економічної діяльності [10], ухваленої Економічною і соціальною радою ООН, «Транспорт» належить до галузей сфери матеріального виробництва, а не до Сервісів¹.

г) Відповідно до Національного класифікатора України та Класифікації видів економічної діяльності України [11] «Транспорт» також відно-

ситься до однієї з основних «галузей економіки»², яка «*об'єднує виробничі одиниці, що здійснюють переважно однакові чи подібні види економічної діяльності*».

д) Відповідно до Національної транспортної стратегії України на період до 2030 року [12] «*Транспортна галузь є однією з базових галузей економіки, має розгалужену залізничну мережу, розвинуту мережу автомобільних шляхів, морські порти та річкові термінали, аеропорти та широкую мережу авіаційних сполучень, вантажних митних терміналів, що створює необхідні передумови для задоволення потреб користувачів транспорту ...*». Поряд з тим, відомо, що сама Стратегія «*розроблена для комплексного розв'язання наявних проблем в транспортній галузі та містить пріоритети її розвитку, зокрема у контексті впровадження євроінтеграційного курсу та імплементації Угоди про асоціацію між Україною, з однієї сторони, та Європейським Союзом, Європейським співтовариством з атомної енергії і їхніми державами-членами* [13], з іншої сторони, ратифікованої Законом України від 16 вересня 2014 р. № 1678-VII) [14], а також зміни геополітичного середовища в регіоні».

Таким чином, підкреслюємо наступне:

– у всіх наведених вище нормативно-правових документах визнано, що «Транспорт» є самостійною галуззю економіки й найважливішою галуззю суспільного виробництва, що об'єднує певні визначені законодавством види економічної

¹ Розділ 7. Транспорт, складське господарство та зв'язок. 71 Транспорт та складське господарство. 711 Сухопутний транспорт. 712 Водний транспорт. 713 Повітряний транспорт. 719 Пов'язані з транспортом види обслуговування. 72. 720 Зв'язок [10].

² Н Транспорт, складське господарство, пошта та кур'єрська діяльність. 49 Наземний і трубопровідний транспорт. 50 Водний транспорт. 51 Авіаційний транспорт. 52 Складське господарство та допоміжна діяльність у сфері транспорту, 53 Пошта та кур'єрська діяльність [11].

діяльності, які використовуються у вітчизняних статистичних класифікаціях;

– транспорт в процесі суспільного виробництва виконує особливу соціально-економічну функцію – забезпечує продовження будь-якого виробництва шляхом переміщення його продукції (вантажу) та виконання інших супроводжуючих видів діяльності з організації та реалізації такого переміщення, створюючи додану вартість будь-якого товару;

– транспортна галузь має багаторівневу систему управління, в якій державне регулювання здійснюється Кабінетом Міністрів України та Центральними органами виконавчої влади, зокрема Міністерством Інфраструктури України;

– у наведених вище Класифікаторах, виходячи із критерію подібності (спорідненості) видів економічної діяльності, які використовуються у *«національних статистичних класифікаціях, згармонізованих із міжнародними»* [11, вступ], розділи що пов'язані з «Транспортом» не включають послуги краси, готельно-ресторанну справу, громадське харчування, фізичну культуру і спорт, подорожі, туризм та рекреацію, громадське здоров'я та охорону праці.

3. Вважаємо необґрунтованим виключення із нового Переліку спеціальності «Транспортні технології (за видами)», як самостійної. Відповідно до даних Єдиної державної бази з питань освіти [15, 16] у галузі знань 27 «Транспорт» найбільш популярною серед абітурієнтів у 2023 р. була спеціальність 275 «Транспортні технології (за видами)». На цю спеціальність у 2023 р. було подано 6874 заяви, у той час, як на інші спеціальності галузі абітурієнти подали дещо менше заяв: «Автомобільний транспорт» – 5034 заяви, «Морський та внутрішній водний транспорт» – 2301 заяви; «Авіаційний транспорт» – 823 заяви; «Залізничний транспорт» – 592 заяви.

Таким чином із нового Переліку виключена сама затребувана і конкурентоспроможна спеціальність 275 «Транспортні технології (за видами)», яка визначена МОН України у якості регульованої [6].

Вважаємо це неприпустимою помилкою і сподіваємося, що вона найближчим часом буде виправлена, оскільки за цією спеціальністю готують затребуваних ринком праці фахівців, які добре розуміються на питаннях: комерційної експлуатації транспортних засобів (за видами), організації перевезень та управління на транспорті (за видами), технологій перевезень вантажів і технологій організації та реалізації вантажних опера-

цій, організації роботи портів і транспортних вузлів (за видами транспорту), взаємодії різних видів транспорту, транспортного забезпечення логістичних систем різних рівнів і масштабів, організації транспортно-експедиторського та митно-брокерського обслуговування вантажопотоків.

4. Не знаходить нашого розуміння об'єднання спеціальностей, які є змістовно самостійними та затребуваними сучасним ринком праці, зокрема:

– 271 «Морський та внутрішній водний транспорт» (спеціалізації 271.01 «Навігація і управління морськими суднами»; 271.02 «Управління судовими технічними системами і комплексами»; 271.03 «Експлуатація судового електрообладнання і засобів автоматики»);

– 275 «Транспортні технології (за видами)» (спеціалізація 275.01 «Транспортні технології (на морському та річковому транспорті)»).

В новому Переліку спеціальність під назвою «Морський та внутрішній водний транспорт» об'єднує ці дві спеціальності, які традиційно є самостійними. Одна відповідає за технічну експлуатацію морського та внутрішнього водного транспорту і регулюється національним [6] та міжнародним [7] законодавствами; друга – за його комерційну експлуатацію і регулюється лише національним [6] законодавством:

– за спеціальністю 271 «Морський та внутрішній водний транспорт» традиційно готують плавсклад (командний склад) для роботи на судах світового флоту (фахівців – штурманів (судноводіїв), механіків, електромеханіків). Відбувається це за певним Стандартом вищої освіти (ВО), який містить три вищезазначені спеціалізації. Також ця спеціальність передбачає надання професійної кваліфікації на підставі відповідних професійних стандартів та отримання робочого диплому, який надає право випускникам працювати за спеціальністю;

– за спеціальністю 275 «Транспортні технології (на морському та річковому транспорті)» традиційно готують фахівців-експлуатаційників для роботи у берегових підрозділах судноплавних компаній, а також на інших підприємствах транспортної галузі та в інших сферах морського бізнесу (фрахтування, агентування, транспортно-експедиторська, сюрвейерська, митно-брокерська, крьюінгова, стівідорна та ін. діяльність). Випускники цієї спеціальності сьогодні працюють на різних підприємствах транспортної галузі, у різних сферах морського бізнесу і транспортної логістики.

Очевидно, що базові знання, загальні та фахові компетентності у робітників командного складу

сучасних суден та берегових працівників експлуатаційних підрозділів повинні бути різними. Сьогодні це враховано у відповідних Стандартах ВО, а також в інших нормативних документах і чинних законодавчих актах.

Наприклад, сьогодні випускникам спеціальності 271 «Морський та внутрішній водний транспорт» присвоюються звання осіб командного складу морських суден відповідно до вимог Міжнародної конвенції про підготовку і дипломування моряків та несення вахти 1978 року [7], з поправками, а також відповідно до національних вимог щодо підготовки моряків на підставі отриманих ними освітніх кваліфікацій, передбачених відповідним Стандартом ВО. Професійні кваліфікації випускникам спеціальності 271 «Морський та внутрішній водний транспорт» присвоюються уповноваженими органами на підставі професійних стандартів. Звання осіб командного складу морських суден присвоюються за процедурою, визначеною Кодексом торговельного мореплавства України та Положенням про звання осіб командного складу морських суден та порядок їх присвоєння, що затверджується Міністерством інфраструктури України.

У свою чергу, спеціальність 275 «Транспортні технології (на морському та річковому транспорті)» не передбачає присвоєння випускникам професійної кваліфікації, але є практично єдиним джерелом підготовки кадрів для роботи на підприємствах морегосподарського комплексу і внутрішньоводного транспорту України.

При об'єднанні вищеназваних спеціальностей 271 і 275 у частині спеціальності 1041 «Transport service» МСКО з відповідним змістовним наповненням, виникає об'єктивна необхідність:

– в розробці нових Стандартів ВО і нових професійних Стандартів з урахування змісту спеціальності 1041 «Transport service» МСКО;

– в узгодженні загальних і фахових компетентностей спеціальностей 271 і 275, а також відповідних програмних результатів навчання у частині їх відповідності спеціальності 1041 «Transport service» МСКО;

– у перегляді існуючої і налагодженої системи підготовки командного складу морських суден з коригуванням відповідної національної нормативно-правової бази та її узгодженням з чинним міжнародним законодавством у цій сфері. Цей процес буде значно ускладнений у частині підготовки фахівців за спеціалізаціями 271.02 «Управління судновими технічними системами і комплексами»; 271.03 «Експлуатація суднового

електрообладнання і засобів автоматики», які регулюються національним [6] та міжнародним [7] законодавствами. Оскільки ці спеціалізації відповідно до нового Переліку та змісту МСКО переходять до галузі знань «G» під назвою «Інжиніринг, виробництво та будівництво», в якій відповідні спеціальності G4 та G13 є нерегульованими (0716 «Motor vehicles, ships and aircraft», 0713 Electricity and energy, 0715 Mechanics and metal trades) [17].

5. Поряд з наведеними вище аргументами, звертаємо увагу, що:

– Міжнародна стандартна класифікація освіти (МСКО) [8] передбачає 10 галузей знань і завершується строкою «99 Field unknown». Це зроблено UNESCO з метою можливості розширення і уточнення переліку галузей і спеціальностей при періодичному перегляді цього документу. Крім того, різні країни при розробці релевантних національних документів мають право враховувати свій національний досвід і традиції;

– Проект нового Переліку галузей знань і спеціальностей [2], на відміну від МСКО [8], передбачає 11 галузей знань. Тобто, враховуючи національний аспект і поточну ситуацію, новий Перелік містить у якості самостійної галузь знань «Безпека і оборона» (шифр L), яка є освітньою і науково-фундаментальною основою діяльності Міністерства оборони України. Це логічно і обґрунтовано, не дивлячись на те, що в МСКО такої галузі немає, а відповідна спеціальність за кодом 1031 також входить до галузі «Сервіси».

Таким чином всім представникам транспортної спільноти залишається лише сподіватися, що це означає «відкритість» національного Переліку галузей знань і спеціальностей до позитивних змін, обґрунтованих доповнень і коригувань, враховуючи національні інтереси та завдання з належного транспортного забезпечення військової та цивільної інфраструктури України, підвищення конкурентоспроможності та ефективності її транспортної системи; безпечного для суспільства інноваційного розвитку транспортної галузі та її інтеграції в європейську транспортну мережу.

Висновки. Встановлені і наведені вище факти, висловлені думки і сформульовані застереження, які отримані в результаті аналізу проекту нового Переліку галузей знань і спеціальностей, а також чинного законодавства національного та міжнародного рівнів, дають підстави зробити наступні висновки:

1. Доцільним є збереження у новому Переліку традиційної для вітчизняної освіти, науки та

Пропозиції щодо нового переліку галузей знань і спеціальностей, за якими здійснюється підготовка здобувачів вищої та фахової передвищої освіти, у частині структури галузі знань «Транспорт» та відповідності транспортних спеціальностей Міжнародній стандартній класифікації освіти [8]

Галузь знань		Спеціальність		Галузь знань «Транспорт» з її деталізацією за Міжнародною стандартною класифікацією освіти [8] і Постановою КМУ від 29.04.2015 р. № 266 [9]
Шифр	Найменування	Код	Найменування	Код і найменування
М	Транспорт	М1	Морський та внутрішній водний транспорт	0716 Motor vehicles, ships and aircraft
				1041 Transport services
		М2	Авіаційний транспорт	0716 Motor vehicles, ships and aircraft
				1041 Transport services
		М3	Залізничний транспорт	0716 Motor vehicles, ships and aircraft
				1041 Transport services
				0732 Building and civil engineering
		М4	Автомобільний транспорт	0716 Motor vehicles, ships and aircraft
				1041 Transport services
		М5	Транспортні технології (за видами)	1041 Transport services

практики галузі знань «Транспорт», враховуючи національний контекст і відповідний досвід.

2. Доречним є розміщення галузі знань «Транспорт» у новому Переліку після галузі знань Л «Безпека і оборона», що є;

– логічним, оскільки в МСКО спеціальність «Транспортний сервіс» (код 1041) слідує за спеціальністю «Безпека і оборона» (код 1031);

– обґрунтованим і виправданим, оскільки неможливо організувати належну безпеку і оборону країни без ефективного транспортного забезпечення її військової та цивільної інфраструктури, що доведено сучасною ситуацією у нашій країні.

3. Логічним є присвоєння галузі знань «Транспорт» коду «М» зі збереженням кодування спеціальностей Міжнародної стандартної класифікації освіти (МСКО) [8], яке встановлено Постановою КМУ «Про затвердження переліку галузей знань і спеціальностей, за якими здійснюється підготовка здобувачів вищої освіти» [9] (табл. 2).

4. Правомірним є збереження існуючої структури галузі знань «Транспорт» (табл. 2), зокрема спеціальності «Транспортні технології (за видами)», яка за результатами вступної компанії 2023 р. стала найбільш популярною серед абітурієнтів у галузі знань 27 «Транспорт». А випускники цієї спеціальності (а також спеціальності «Організація перевезень та управління на транспорті», яка є попередником спеціальності «Транспортні технології (за видами)») довели

свою фаховість та професіоналізм, зокрема під час війни, яка «одним махом» зруйнувала діючі системи доставки вантажів, поставив перед галуззю та її фахівцями-транспортниками нові питання і виклики. Випускники транспортних закладів вищої освіти сьогодні продовжують справлятися з проблемами транспортної галузі, наполегливо працюючи, розробляючи та організовуючи нові шляхи сполучення і ланцюги постачань, зокрема продукції українського агропромислового комплексу. Очевидно, що після Перемоги, вкрай необхідними для нашої країни стануть такі фахівці-транспортники, які зможуть розв'язувати надскладні сучасні задачі у сфері транспорту. Саме за спеціальністю «Транспортні технології (за видами)» сьогодні готують кваліфікованих фахівців-транспортників, які здатні:

– організувати ефективно транспортне забезпечення обороноздатності нашої країни, її військової та цивільної інфраструктури;

– практично реалізувати інтеграцію національної транспортної системи у транс'європейську мережу транспортних комунікацій у контексті євроінтеграційного курсу нашої країни.

Сподіваємося, що думка представників професійної транспортної освіти і науки буде почута, а пропозиції будуть враховані при розгляді проекту нового Переліку галузей знань і спеціальностей, за якими здійснюється підготовка здобувачів вищої освіти.

Список літератури:

1. Інформація на сайті МОН України щодо Проекту нового переліку галузей знань і спеціальностей, за якими здійснюється підготовка здобувачів вищої та фахової передвищої освіти. URL: <https://mon.gov.ua/ua/news/proyekt-novogo-pereliku-galuzej-znan-i-specialnostej-za-yakimi-zdijsnyuetsya-pidgotovka-zdobuvachiv-vishoyi-ta-fahovoyi-peredvishoyi-osviti>.
2. Запропонований перелік галузей знань і спеціальностей, за якими здійснюється підготовка здобувачів вищої та фахової передвищої освіти. URL: <https://mon.gov.ua/storage/app/media/gromadske-obgovorennya/2023/08/08/НО-proyekt.post.KMU-perelik.haluz.znan.i.spetsial.VO.08.08.2023.pdf>.
3. Закон України «Про вищу освіту». URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1556-18#Text>.
4. Господарський кодекс України. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/rada/show/436-15#Text>.
5. Закон України «Про транспорт». URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/232/94-вр#Text>.
6. Перелік регульованих спеціальностей. – Наказ МОН. URL: <https://mon.gov.ua/ua/news/zatverdzheno-perelik-regulovanih-specialnostej-nakaz-mon>.
7. Міжнародна конвенція про підготовку і дипломування моряків та несення вахти 1978 року. URL: https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/995_053#Text.
8. International standard classification of education (Міжнародної стандартної класифікації освіти (МСКО)). URL: <http://uis.unesco.org/sites/default/files/documents/international-standard-classification-of-education-fields-of-education-and-training-2013-detailed-field-descriptions-2015-en.pdf?fbclid=IwAR3VFSkzH5klU5nSHUjVw1Y0ZZGnEvYyKVPI6pmHq4tBISwAtEA3ZIT5vNs>.
9. Постанова Кабінету Міністрів України від 29 квітня 2015 р. № 266 «Про затвердження переліку галузей знань і спеціальностей, за якими здійснюється підготовка здобувачів вищої освіти {Із змінами, внесеними згідно з Постановами КМ № 674 від 27.09.2016; № 53 від 01.02.2017; № 762 від 07.07.21; № 1392 від 16.12.22}. URL: https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/266-2015-p?fbclid=IwAR3BtdD9y7a6qtDnVXJ02xnzy-FStHdfhODsdAoEr6WIU_OkWLv-D-sSJq4#Text.
10. Міжнародна стандартна господарська класифікація усіх видів економічної діяльності. URL: https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/995_c35#Text.
11. Національний класифікатор України. Класифікація видів економічної діяльності України. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/rada/show/vb457609-10#Text>.
12. Національна транспортна стратегія України на період до 2030 року. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/430-2018-p#Text>.
13. Угода про асоціацію між Україною та ЄС. URL: https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/984_011#Text.
14. Закон України про ратифікацію Угоди про асоціацію між Україною, з однієї сторони, та Європейським Союзом, Європейським співтовариством з атомної енергії і їхніми державами-членами, з іншої сторони. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1678-18#Text>.
15. Єдина державна електронна база з питань освіти. URL: <https://vstup.edbo.gov.ua/statistics/>
16. Рейтинг спеціальностей у вишах за кількістю поданих заяв. URL: https://osvita.ua/consultations/89708/?fbclid=IwAR1fjVoyZshqUCWO25gjUerE_1-me6zVjU3sO08q7cOpLAUE4hPyQxX9EF.
17. Таблиця відповідності нового Переліку галузей знань і спеціальностей, за якими здійснюється підготовка здобувачів вищої освіти, затвердженому постановою Кабінету Міністрів України від Х.Х.2023 No X (Перелік 2023), Переліку галузей знань і спеціальностей, за якими здійснюється підготовка здобувачів вищої освіти, затвердженому постановою Кабінету Міністрів України від 06.11.2015 No 266 (Перелік 2015). URL: <https://mon.gov.ua/storage/app/media/gromadske-obgovorennya/2023/08/08/НО-proyekt.post.KMU-perelik.haluz.znan.i.spetsial.TVO-Tablytsya.vidpovidnosti.08.08.2023.pdf>.

Kyrylova O.V., Kyrylova V.Yu. UPDATE OF THE PROBLEM OF PROFESSIONAL TRAINING OF PERSONNEL FOR THE TRANSPORT INDUSTRY OF UKRAINE THROUGH THE PRISM OF THE NEW LIST OF FIELDS OF KNOWLEDGE AND SPECIALTIES FOR WHICH HIGHER EDUCATION ACQUIRES ARE TRAINED

The article examines the issue of the draft resolution of the Cabinet of Ministers of Ukraine (CMU) proposed and posted on the website of the Ministry of Education and Culture of Ukraine "On approval of the list of fields of knowledge and specialties for which higher education candidates are trained." The creation of this document is related to the need to harmonize and ensure the comparability of state statistics with such international standards and recommendations as the international standard classification systems of the UN. However, it was established that all changes in the part of transport specialties of the new list are presented as substantively unsubstantiated and contrary to the Laws of Ukraine "On Higher Education", "On Transport", the Economic Code of Ukraine, the International Standard Economic Classification of All Types of Economic Activities, the National Classifier of Ukraine and Classification of types of economic activity of Ukraine.

It was found that the field of knowledge "Transport" and the specialty "Transport technologies (by types)" are completely absent in the new list, and all other purely engineering transport specialties have been transferred to the new field of knowledge "Services" together with such specialties as "Beauty services", "Hotel and restaurant business and catering", "Physical culture and sports", "Travel, tourism and recreation", "Public health and occupational safety". At the same time, it is obvious that there is no relationship between the above types of services and transport.

It is shown that in order to ensure the comparability of state statistics with the International Standard Classification of Education (ISCE), it is not necessary to radically change the national list of specialties, destroying strategically important and recognized fields of knowledge and specialties, in particular the field of knowledge "Transport" and the specialty "Transport Technologies (according to species)". For this purpose, when providing information on state statistics in comparison with international standards, it is sufficient to use the correspondence already established by national legislation between the transport specialties available in Ukraine and the list of specialties of the ISC, which is defined in the Resolution of the CMU dated April 29, 2015 No. 266 "On approval of the list of industries knowledge and specialties, according to which higher education applicants are trained."

Objective reservations and possible consequences of approving the new List are formulated, which, first of all, are related to the disappearance of the basis of the educational and scientific potential of the transport industry, the foundation for its further development and improvement, as well as the source of training of professional personnel for the transport industry of Ukraine.

Key words: *transport, transport technologies, field of knowledge, specialty, new list of fields of knowledge and specialties.*

Кунда Н.Т.

Національний транспортний університет

ОПТИМІЗАЦІЯ ПАЛИВНОЇ СКЛАДОВОЇ ВИТРАТ НА МІЖНАРОДНІ АВТОМОБІЛЬНІ ПЕРЕВЕЗЕННЯ

Від здатності автотранспортного підприємства зменшити собівартість перевезень залежить його конкурентоспроможність на міжнародному ринку автотранспортних послуг. Значною статтею витрат при виконанні перевезень вантажів є витрати перевізника на оплату пального. Метою роботи є дослідження змін у структурі загальних витрат та виявлення можливостей зменшення паливної складової. Проаналізовано структуру загальних витрат автотранспортного підприємства, які традиційно поділяють на прямі, що безпосередньо пов'язані з виконанням рейсу, та опосередковані – не пов'язані з виконанням конкретного рейсу. Наведено типовий розподіл витрат з указанням питомої ваги кожної статті в загальній сумі витрат. Відзначено, що зовнішні фактори суттєво позначилися на вартості перевезень, на самій структурі витрат. Для дослідження змін у структурі проаналізовано показники здійснення 10-ти міжнародних рейсів з близькими характеристиками умов перевезень та використання транспортних засобів. Виявлено суттєві відмінності від типового розподілу та запропоновано іншу сітку витрат, яка краще характеризує виконання конкретного перевезення. Однак, як і раніше, паливно-мастильні матеріали є найбільш вагомою частиною витрат на здійснення перевезення. Мінімізація шляхом раціонального вибору обсягу і місць заправки є простим способом зниження витрат на паливо, але потребує врахування практичних аспектів, як то прокладання маршруту через АЗС, де є знижки на дизельне паливо, використання паливних карток, врахування завантаженості пробігу. На прикладі конкретного маршруту показано, що шляхом раціональної заправки можна вдвічі знизити витрати на паливо. Для зниження витрат на паливну складову необхідно постійно проводити аналіз цін на нафтопродукти та знаходити раціональні технічні та організаційні рішення. Дослідження доводить результативність запропонованих підходів.

Ключові слова: міжнародні автомобільні перевезення, структура витрат, статті витрат, паливно-мастильні матеріали, оптимізація.

Постановка проблеми. Одним з найпотужніших та найпопулярніших видів транспорту є автомобільний. Цей вид транспорту дозволяє забезпечувати такий важливий спосіб доставки, як «від дверей до дверей». Міжнародні автомобільні перевезення – це перевезення вантажів та пасажирів між кількома країнами з обов'язковим перетином державного кордону, які здійснюються за міжнародними конвенціями та угодами, укладеними між цими країнами. У міжнародних перевезеннях виявляються експлуатаційні і економічні переваги автомобільного транспорту – малі терміни доставки вантажів, можливість перевезення їх у більш легкій та економічній упаковці, а у деяких випадках і без тари, максимальне скорочення товарних запасів, скорочення перевантажних операцій, без потреби у складських приміщеннях, різке зменшення якісних і кількісних витрат на перевезення. Автомобільним транспортом перевозиться більше вантажів, ніж будь-яким іншим видом транспорту.

На сьогодні організація міжнародного перевезення розглядається як доволі складний процес. Між-

народне перевезення вантажу зазвичай є вартісною послугою. Це пояснюється дорогим паливом, амортизаційними відрахуваннями на АТЗ, митними процедурами, платним проїздом по території іноземних держав, обов'язковим державним страхуванням.

Від здатності автомобільного підприємства зменшити собівартість перевезень залежить його конкурентоспроможність на національному та міжнародному ринку автотранспортних послуг. Таке зменшення забезпечить отримання сталих прибутків підприємствам, так як ціна на транспортну послугу знизиться. Також надбання нових клієнтів за рахунок певних переваг дає можливість для успішної роботи таких підприємств. Однією з найважливіших таких переваг є зниження собівартості перевезення. Тому завжди актуальною є тема зменшення витрат на перевезення. В першу чергу, це зробить велику вигоду перевізнику, а як наслідок – здешевлення товару для споживача.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Питанням визначення загальних витрат на виконання міжнародних перевезень вантажів присвя-

чена значна кількість публікацій. Вагомий внесок у дослідження ступеню впливу різних статей витрат на кінцеву величину зробили такі науковці як А. Гальчинський, Е. Гончарова, О. Коваленко, Г. Савицька, Г. Тарасюк, Г. Тимошенко, С. Осьмак, Т. Яровенко та ін. Проте проблема формування раціональної структури витрат не втрачає своєї актуальності, оскільки впливає на виробку управлінського рішення щодо організації перевезення.

Постановка завдання. Для розуміння шляхів скорочення витрат на міжнародні вантажні перевезення насамперед треба визначитися зі складом та змістом цих витрат. Априорі найбільш значною статтею витрат при організації та виконанні міжнародних перевезень є витрати перевізника на оплату пального. А для забезпечення головної мети існування підприємства, тобто щоб мати змогу займати конкурентне місце на ринку транспортних послуг, потрібно прагнути до зменшення витрат на пальне. **Метою статті** є розробка рекомендацій щодо зниження паливної складової загальних витрат на перевезення. Для досягнення мети потрібно вирішити такі задачі: перша – дослідження змін у структурі загальних витрат та друга – виявлення можливостей оптимізації складу витрат у частині паливної складової.

Виклад основного матеріалу. Для визначення шляхів скорочення витрат на виконання міжнародних перевезень вантажів спочатку проаналізуємо структуру витрат, тобто склад і зміст. Загальні витрати автопідприємства розділяють на прямі та опосередковані витрати [1]. Прямі витрати – витрати, що безпосередньо пов'язані з виконанням рейсу. Опосередковані витрати – витрати автопідприємства, що мають відношення до перевезень, але не пов'язані з виконанням конкретного рейсу.

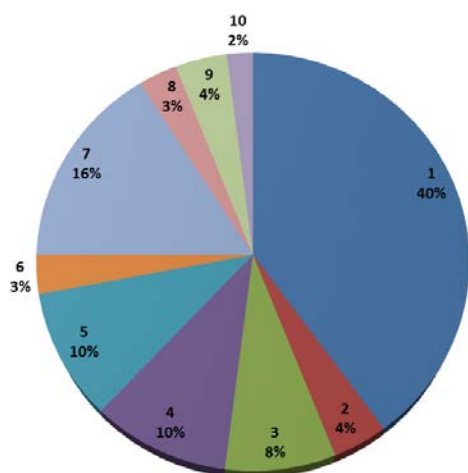
До прямих витрат відносять:

- паливно-мастильні матеріали (ПММ) для рухомого складу (РС);
- доплата водіям за роз'їздний характер роботи (тобто добові або відшкодування витрат на відрядження);
- забезпечення рейсів (тобто витрати, які водій безпосередньо оплачує при виконанні рейсу: оплата митних і дозвільних документів та процедур, оплата автобанів і поромів, мийок і стоянок, добовок і він'єток, документів гарантування доставки товарів до митниці призначення – книжки МДП або документа Т).

Опосередковані витрати включають:

- заробітну плату (ЗП) водіїв – основну та додаткову – з нарахуванням на соціальні заходи;
- технічне обслуговування (ТО) і ремонт автотранспортних засобів (АТЗ);
- знос та відновлення автомобільних шин;
- амортизація АТЗ;
- обов'язкові платежі та накладні витрати, до яких входить заробітна плата адміністративно-управлінського персоналу, страхові внески, ліцензії, візи водіям, сертифікати та свідоцтва про допущення АТЗ до перевезення вантажів піж митними печатками і пломбами, технічний огляд АТЗ, вартість бланків документації, програмне забезпечення, засоби навігації та зв'язку.

Впродовж тривалого періоду розподіл витрат по статтях з указанням питомої ваги статті в загальній сумі витрат зазвичай мав вигляд, представлений на рис. 1 [2]. При розробці схем організації перевезення вантажів українські міжнародні перевізники мали такий розподіл за взірцевий: схема з такими показниками вважалася раціонально розробленою.



1. ПММ: 35 – 45%;
2. Заробітна плата водіїв з нарахуваннями: 3 – 5%;
3. Доплата водіям (добові, відшкодування на відрядження): 7 – 9%;
4. Забезпечення рейсів: 10 – 12%;
5. ТО і ремонт АТЗ: 10 – 15%;
6. Знос та відновлення шин: 2 – 5%;
7. Амортизаційні відрахування: 15 – 20%;
8. Страхові внески: 3%;
9. Накладні витрати: 4%;
10. Засоби зв'язку та навігації: 2%.

Рис. 1. Розподіл витрат на міжнародне перевезення вантажів за статтями [запозичено з [2]]

Економічна криза, викликана епідемією COVID-19 та повномасштабною агресією РФ, спричинила зростання цін на паливе, суттєво позначилася на вартості перевезень, на самій структурі витрат [3].

Для вирішення першої задачі дослідження змін у структурі витрат на поточний період було проаналізовано показники здійснення 10-ти міжнародних автомобільних перевезень вантажів маршрутами з України в напрямку Західної Європи, прокладених дорогами класу E та виконаних рухомим складом провідних світових виробників з близькою лінійною нормою витрат палива та класом екологічної безпеки (категорії Євро-5, Євро-6) [4]. Розкиди значень складають: для лінійної норми витрат палива на 100 км, H_L , л/100км, – $30\pm 10\%$; для коефіцієнта статичного використання вантажопідйомності автомобіля відповідно до класу вантажу, $\gamma_{стат}$ – $0,85\pm 10\%$; для вантажопідйомності транспортного засобу, q , – $20\pm 10\%$. У припущенні про близькі характеристики умов перевезень та використання автотранспортних засобів було виконано ряд розрахунків показників перевезення. Досліджувані маршрути також були розділені на умовно «довгі» ($L=2800\pm 100$ км) – це маршрути 1–5, та умовно «середні» ($L=2000\pm 200$ км) – це маршрути 6–10. Тривалість рейсів T розрахована за вимогами ЄУТР (для екіпажів з одного та двох водіїв). Розрахунки собівартості 1км пробігу $S_{1км}$, 1ткм транспортної роботи $S_{1ткм}$ та витрат C проводилися за розцінками другого кварталу 2023 р.; результати представлені в табл. 1 (складено автором).

Питання впливу статей витрат на кінцеву величину загальних витрат завжди було в центрі уваги дослідників [5, 6]. Чи змінилася структура витрат на здійснення міжнародного перевезення в нинішній економічній ситуації, проаналізуємо на прикладі наведених маршрутів. Представимо дещо іншу сітку витрат (термін, який часто використовують автоперевізники), яка більше відповідає поставленій задачі аналізу конкретного перевезення. Слід відмітити, що найбільш вагомі статті витрат залишилися майже незмінними за змістом.

1. Паливно-мастильні матеріали ПММ. До них належать паливе (дизельне паливо, бензин, газ) та мастильні матеріали (ММ): оливи моторні, трансмісійні, спеціальні; рідини гальмівні та амортизаційні; мастила консистентні [7]. Витрати на паливе складаються з двох частин (витрати на пробіг та витрати на транспортну роботу). Вартість оливо, рідин та мастил розраховано у розмірі 10–15% від вартості пального.

2. Фонд заробітної плати ФЗП включає: мінімальний оклад $OK_{мін}$, виходячи з розміру мінімальної заробітної плати (РМЗП); відрахування до системи загальнообов'язкового державного страхування, так званий єдиний соціальний внесок $C_{ССВ}$ (ставка ЄСВ – 22% від $OK_{мін}$); витрати на відрядження $C_{відр}$ – згідно з діючими нормами, установленими Податковим кодексом України, з урахуванням часу руху в прямому і зворотному напрямках та часу на розвантаження-завантаження в пункті призначення.

3. Забезпечення рейсу – це всі види витрат, які оплачує перевізник безпосередньо при виконанні рейсу: візи водіям; карнет TIR чи документ T; дозволи на міжнародне перевезення (одноразові чи ліцензія ЄКМТ); страхові платежі; дорожні, екологічні, митні збори; платні автомагістралі та платні стоянки.

4. Витрати на сервісне технічне обслуговування $C_{серв}$ автомобілів європейського виробництва (технічний огляд ТО та ремонт Р) визначено на основі розцінок спеціалізованих станцій. Загалом вартість річного сервісного обслуговування складає 1000÷1500€ в залежності від марки автомобіля. Витрати на 1 рейс розраховано пропорційно тривалості рейсу.

5. Витрати на відновлення та ремонт автомобільних шин $C_{ш}$ визначено з урахуванням довжини маршруту, норм відрахувань на відновлення, кількості та цін шин, установлених на одиниці рухомого складу.

6. Амортизаційні відрахування на відновлення рухомого складу A_v визначено з урахуванням довжини маршруту, норм амортизаційних відрахувань на 1000 км пробігу автопоїзда та балансової вартості авто тягача та причепа. Витрати на 1 рейс розраховано пропорційно довжині маршруту.

7. Загальногосподарські витрати $C_{госп}$ розраховано у розмірі 15% від вартості вищевказаних прямих витрат.

8. Непередбачені витрати $C_{нп}$ у розмірі 100 € на одного водія та 200 € на двох водіїв закладають у калькуляцію вартості на випадок неочікуваних ситуацій.

Результати розрахунків показників виконання рейсів по окремих статтях для схеми організації роботи екіпажу «турна їздка» наведено в таблиці 2. Слід вказати, що стаття 8 в таблиці 2 не представлена, оскільки є постійною величиною. Дані наведено у вартісному вираженні (€).

Для оцінки впливу кожної статті в результуючому показнику витрат визначено їх питому вагу у складі витрат, що представлено в таблиці 3. Дані наведено у відсотковому вираженні (%).

Таблиця 1

Показники виконання міжнародних автомобільних перевезень

№ вар	Маршрут	L, км	T, діб		C, €		S _{1км²} €/км		S _{1ткм²} €/ткм	
			1 вод	2вод	1 вод	2 вод	1 вод	2 вод	1 вод	2 вод
1	Київ-Словаччина-Австрія-Німеччина-Париж	2864	5	3,2	3927	4470	1,37	1,56	0,053	0,060
2	Черкаси-Угорщина-Сербія-Болгарія-Цюріх	2798	4,2	2,8	2552	2932	0,91	1,05	0,040	0,046
3	Полтава-Словаччина-Чехія-Німеччина-Копенгаген	2727	4,7	3,8	4020	4637	1,47	1,70	0,082	0,094
4	Кременчук-Словаччина-Австрія-Люксембург	2705	5	3,7	3870	4367	1,43	1,61	0,069	0,077
5	Київ-Польща-Німеччина-Бельгія-Бірінгем	2655	5,1	3,6	3227	3789	1,22	1,43	0,14	0,16
6	Дніпро-Угорщина-Австрія-Мюнхен	2278	4,1	2,7	3122	3551	1,37	1,56	0,110	0,126
7	Львів-Румунія-Болгарія-Афіни	1995	4	2,7	3044	3724	1,53	1,87	0,088	0,108
8	Київ-Польща-Німеччина-Цюріх	2103	4,1	2,7	2441	3337	1,16	1,59	0,037	0,050
9	Вінниця-Угорщина-Словенія-Мілан	1884	3,3	2,6	3175	3514	1,69	1,87	0,065	0,072
10	Рівне-Польща-Чехія-Німеччина-Берн	1881	4	2,6	2992	3405	1,58	1,86	0,065	0,077

Таблиця 2

Оновлений розподіл статей витрат на виконання міжнародних автомобільних перевезень, €

№	Маршрут	H _L , л/ /100км	γ	ПММ		ФЗП	Забезп. рейсів	Сервіс C _{серв}	Відн. Шин C _ш	Аморт. РС A _в	Заг. госп. C _{госп}
				пальне	ММ						
1	Київ – Париж	32	1,0	1453	174	959	687	11	480	160	345
2	Черкаси – Цюріх	27	0,75	1062	106	823	244	9	226	154	204
3	Полтава – Копенгаген	30	0,9	1233	160	894	888	10	489	183	579
4	Кременчук – Люксембург	32	0,8	1437	172	926	675	10	453	160	334
5	Київ – Бірінгем	27	0,8	929	112	946	683	10	445	133	332
6	Дніпро – Мюнхен	27	0,75	991	119	725	499	8	396	175	438
7	Львів – Афіни	27	0,8	832	92	846	840	9	312	134	460
8	Київ – Цюріх	27	0,99	721	94	1129	435	10	178	149	406
9	Вінниця – Мілан	32	1,0	1076	151	795	455	8	294	102	432
10	Рівне – Берн	27	0,85	936	107	805	763	7	315	73	444

[Обчислено автором]

Треба зазначити, що досить незначний відсоток витрат на сервісне обслуговування пояснюється тим, що розрахунки виконувалися на конкретний рейс (а не на рік); також не представлені непередбачувані витрати (стаття 8) з огляду на те, що це незмінна величина. Аби оцінити, як впливає довжина маршруту на розподіл витрат, проведено проміжні розрахунки середньозважених значень показників по блоку «довгих» і «середніх» маршрутів, які виявили певні відмінності.

Для зручності проведення порівняльного аналізу з типовим розподілом, зображеним на рис. 1, отримані результати представлено круговою діаграмою. При побудові діаграми було допустимо знехтувати статтею 4 (витрати на сервісне обслуговування) через несуттєвий вплив, але включено статтю 8, що складає приблизно 5% від загальних витрат. Тому вищенаведений порядок статей 1–8 дещо змістився і має такий вид (рис. 2).

Аналізуючи отримані результати, встановлено, що незважаючи на підвищення цін на пальне, питома вага паливної складової в результуючому показнику істотно знизилася, причому цей дещо

несподіваний ефект сильніше проявляється на умовно «середніх» маршрутах.

Однак суттєво зросла оплата роботи водіїв. Хоча встановлення розміру заробітної плати є особистою справою кожного перевізника і залежить від форми організації виконання перевезень, географії перевезень та рівня завантаженості автотранспортного підприємства, вона не може бути нижча за встановлений Законом України «Про Державний бюджет України» розмір мінімальної заробітної плати (РМЗП) на поточний рік, який щороку зростає (у 2023 р. мінімальна заробітна плата становить 6700 грн/місяць). А складові ФЗП – ЄСВ та витрати на відрядження – є похідними величинами від РМЗП.

Також набагато зросли витрати на забезпечення міжнародного рейсу через появу і подорожчання платних послуг (платні автомагістралі, стоянки, вартість документів та їх оформлення тощо).

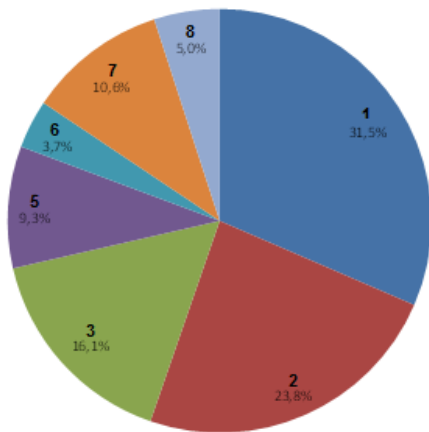
Одночасно перерозподіл спостерігається і по інших статтях витрат, що пояснюється як об'єктивними причинами, так і запропонованим підходом до оцінки структури витрат. Така дина-

Таблиця 3

Оновлений розподіл статей витрат на виконання міжнародних автомобільних перевезень, %

№	Маршрут	ПММ		ФЗП	Забезп. рейсів	Сервіс	Віднов. шин	Аморт. РС	Заг. госп.
		пальне	ММ						
1	Київ – Париж	32,5	3,9	21,5	15,4	0,25	10,7	3,6	7,7
2	Черкаси – Цюріх	36,2	3,6	28,1	8,3	0,31	7,7	5,3	7,0
3	Полтава – Копенгаген	26,6	3,5	19,3	19,2	0,21	10,6	3,9	12,5
4	Кременчук – Люксембург	32,9	3,9	21,2	15,5	0,23	10,4	3,7	7,7
5	Київ – Бірмінгем	24,5	3,0	25,0	18,0	0,26	11,7	3,5	8,8
	Срд-зваж. значення	30,5	3,6	23,0	15,3	0,25	10,2	4,0	8,7
6	Дніпро – Мюнхен	27,9	3,4	20,4	14,1	0,22	11,2	4,9	12,3
7	Львів – Афіни	22,3	2,5	22,7	22,6	0,24	8,4	3,6	12,4
8	Київ – Цюріх	21,6	2,8	33,8	13,0	0,30	5,4	4,5	12,2
9	Вінниця – Мілан	30,6	4,3	22,6	13,0	0,23	8,4	2,9	12,3
10	Рівне – Берн	26,2	3,1	23,6	22,4	0,21	9,3	2,1	13,0
	Срд-зваж. значення	25,7	3,2	24,6	17,0	0,24	8,5	3,4	12,4
	Кінцевий результат	31,5		23,8	16,1	0,25	9,3	3,7	10,6

[Обчислено автором]



1. ПММ: 31,5%
2. Фонд заробітної плати: 23,8%
3. Забезпечення рейсу: 16,1%
5. Відновлення та ремонт шин: 9,3%
6. Амортизація рухомого складу: 3,7%
7. Загальногосподарські витрати: 10,6%
8. Непередбачені витрати: 5%

Рис. 2. Оновлений розподіл витрат на міжнародне перевезення вантажів за статтями (у %) [Сформовано автором]

міка потребує самостійного аналізу та виявлення причин і може стати темою окремого дослідження.

Отже, за результатами дослідження змін у загальній структурі витрат встановлено інший розподіл (рис. 2), який відрізняється від попереднього (рис. 1) тим, що витрати на здійснення перевезення визначаються для конкретного маршруту, а не річні по підприємству, що дає можливість з-поміж близьких варіантів перевезень обрати оптимальний. Попри все залишається незмінним той факт, що паливно-мастильні матеріали є найбільш вагомою частиною витрат на здійснення перевезення.

Для вирішення другої задачі дослідження можливостей оптимізації паливної складової у складі витрат розглянуто, які заходи доцільно запровадити для скорочення паливної складової.

Вартість витраченого пального – це кількість витраченого пального, помножена на ціну 1 л. Потрібна для виконання рейсу кількість пального розраховується як сума лінійних витрат (на пробіг), витрат на виконання транспортної роботи (на перевезення вантажу), а також з урахуванням умов експлуатації – стану дорожнього покриття, допустимої швидкості, кількості смуг руху, наявності підйомів, спусків, поворотів, кліматичних, температурних умов, інших експлуатаційних факторів. У формулі для спрощеного розрахунку (1) вони враховуються значенням коригувального коефіцієнта $K_{\Sigma} = 0,55 \div 0,7$, до складу якого входить 7 поправочних коефіцієнтів у формі відсотків підвищення або зниження базового значення норми витрат пального, що відображають умови руху по автомагістралі для вантажних автомобілів

і автомобілів-тягачів, причому менше значення 0,55 характеризує кращі умови руху по дорогах Західної Європи, більше значення 0,7 – по дорогах України [8]. Загальний вираз для визначення вартості витраченого пального C_n має вид (1):

$$C_n = \left(\frac{H_{Lan}}{100} L + \frac{H_W}{100} W \right) \cdot (0,55 \div 0,7) \cdot C_n, \text{ €} \quad (1)$$

де H_{Lan} – лінійна норма витрати пального на пробіг автопоїзда, л/100 км; визначається як

$$H_{Lan} = H_L + H_W \cdot G_{np}, \text{ л / 100км},$$

де H_L – базова лінійна норма витрати пального на 100 км пробігу, л/100 км;

H_W – додаткова питома норма витрати пального на 100 ткм, л/100 ткм;

G_{np} – споряджена маса причепа (напівпричепа), т;

L – довжина ділянки маршруту, км;

W – транспортна робота, визначається як

$$W = q \cdot \gamma \cdot L_g = Q \cdot L_g, \text{ ткм},$$

де q – вантажопідйомність транспортного засобу, т;

γ – коефіцієнт статичного використання вантажопідйомності автомобіля; визначається за класом вантажу;

L_g – пробіг автомобіля з вантажем, км;

K_Σ – сумарний коригувальний коефіцієнт;

C_n – ціна 1л пального на конкретній ділянці маршруту, €.

Для оптимізації витрат на пальне необхідно враховувати різницю в ціні пального в кожній країні та обмеження на безмитне ввезення пального на територію країн транзиту і призначення (джерела поточної інформації: фахові видання, інформація АсМАП України). Розрахунок проводять окремо для кожної країни маршруту. Мінімізація шляхом раціонального вибору обсягу і місць заправки є простим способом зниження витрат на пальне, але потребує врахування декількох практичних аспектів.

Існують різні види заправки, як то стаціонарні пости заправки на автопідприємствах, станції технічного обслуговування (СТО), де здійснюють заправку мастилами, мережі автозаправних станцій (АЗС). Заправка на автопідприємстві обходиться дешевше, майже за собівартістю пального. Також заправки можуть бути мережеві, що відзначаються високою ціною і вищою якістю пального, і приватні, для яких характерна нижча ціна, а відповідно, і нижча якість пального.

В Україні діє розгалужена мережа АЗС відомих компаній ОККО, KLO, WOG, SOCAR, UPG та інших, які постачають перевізників високоякісним паливом, ціни на яке коливаються залежно від попиту і сезону. Після військового вторгнення

рф держава втратила майже весь імпорт пального. Однак ринок адаптувався до нових умов і мережі АЗС перелаштувалися на постачання пального з країн ЄС, яке є надійним, хоча і значно дорожчим. Слід відзначити, що ЄС запровадив «коридори солідарності», щоб прискорити доставку пального для подолання паливної кризи в Україні.

При плануванні міжнародного перевезення заправки потрібно планувати за критерієм мінімальної вартості, тобто заправлятися у більш «дешевій» країні, наскільки допускають обмеження на безмитне ввезення пального. Якщо все ж доводиться заправлятися в країні з високою ціною на пальне, то тільки в тій кількості, щоб доїхати до кордону країни з більш дешевим паливом, яким і заправитися для подолання наступної ділянки маршруту. Європейські мережі AVIA, Shell, AS24, ABC, ESSO, ORLEN, Lotos теж відрізняються вартістю пального. Крім того, заміські АЗС, що розміщені вздовж основних автомагістралей, характеризуються зручним розташуванням, але й вищими цінами, ніж заправки в населених пунктах, де ціни нижчі, але і знайти їх важче.

Ще один спосіб зниження вартості пального – використання паливних магнітних карток для оплати заправки по безготівковому рахунку, як це прийнято в європейських країнах. Це дає можливість отримати знижки на пальне (до 2,5%) при заправках на АЗС, які є власністю оператора або є партнерськими. Тому зменшення витрат можна досягти, прокладаючи транзитні маршрути через АЗС, де є найбільші знижки на дизельне пальне. Паливні картки – це запорука високого рівня сервісу. Приміром, за картою Е100 можна розрахуватися приблизно за 100 різних послуг: заправка паливом, оплата проїзду по автобанах, через тунелі, на поромках, монтаж автомобільних коліс, ТО, ремонт тощо. До мережі Е100 входять 20 тис. АЗС у 32-х країнах, які мають вигідне місцеположення на магістральних автомобільних маршрутах Західної та Східної Європи, зокрема, 800 АЗС в Україні.

Також при плануванні перевезення необхідно враховувати, що пробіг може бути навантаженим або порожнім чи частково порожнім, що теж впливає на кількість витраченого пального. Крім того, для гарантування безперебійної роботи двигуна вантажного автомобіля в баках по закінченні рейсу повинно залишатися не менше 50 л пального.

На прикладі маршруту 10 «Рівне – Берн» показано процес покрокової оптимізації вартості пального (табл. 4). Обсяг витраченого пального та його вартість визначалися за формулою (1) з урахуванням

Оптимізація витрат на пальне

Країна	Ціна палива €/л	Обмеж. безмит. ввез.	формально		фактично		оптимально			
			л	€	л	€	I спосіб		II спосіб	
							л	€	л	€
Україна	1,26	-	164,1	206,77	114,9	144,77	558,8	705,60	114,9	144,77
Польща	1,50	бак	389,8	584,70	214,4	321,60	Заправка в Україні повний бак		510,9	705,60
Чехія	1,53	бак	287,2	439,42	157,9	241,59			144,77	
Німеч.	1,76	бак+10л	93,8	165,09	51,6	90,82			510,9	705,60
Швейц.	1,99	бак	158,2	314,82	87,0	173,13	67,0	131,34	Запр. в Укр. в ПВ і на корд.	
Усього			1093,1	1710,80	625,8	971,91	625,8	836,94	675,8	850,37
							+50,0	+99,50		
							675,8	936,44		

[Обчислено автором]

поточних цін на пальне по країнах та обмежень на безмитне ввезення автомобільного пального в об'ємі повної заправки паливних баків, технологічно пов'язаних з двигуном [9, 10].

Формально для подолання відстані потрібно витратити 1091 л дизельного пального вартістю за розцінками країн маршруту 1711€.

Фактично з урахуванням коригувального коефіцієнта K_{Σ} , що відображає умови руху по автомагістралі для автомобілів-тягачів, та розцінок на пальне по країнах було би витрачено 626 л загальною вартістю 972 €.

Для реалізації оптимального варіанту рекомендовано планувати заправку в країнах з низькими цінами на пальне. Для даного перевезення найнижча ціна в Україні [11], а наступні країни маршруту дозволяють безмитно ввозити повний бак пального. Об'єм бака залученого до перевезення тягача MERCEDES-BENZ ACTROS 2543Lt становить 560 л.

За першим способом цього вистачить, щоб перетнути територію України, Польщі, Чехії, Німеччини і чверть дороги по Швейцарії (559 л). Доведеться закупити ще 67 л по високих швейцарських цінах та зарезервувати додаткових 50 л для нормальної роботи двигуна, що обійдеться в 936 €. За другим способом пропонується подвійна заправка в Україні. Перша – в пункті відправлення (ПВ) в об'ємі 115 л, щоб подолати українську ділянку маршруту, а по досягненні кордону з ЄС заправити повний бак – цього вистачить, щоб

досягти пункту призначення (510 л) та залишити запас в 50 л. Ті ж 676 л будуть коштувати 850 €.

Отже, з впровадженням кожного заходу спостерігається зниження витрат на пальне: в порівнянні з початковою вартістю пального зменшилася майже вдвічі. Відповідно ще знизилася витрати на мастильні матеріали (на 5 €). За умови прокладання маршруту через АЗС, що надають знижки, можливо зекономити ще 21 €. Таким чином можна додатково мінімізувати вартість паливно-мастильних матеріалів.

Висновки. Українські експерти паливно-енергетичного ринку завіряють, що вітчизняні автоперевізники будуть надійно забезпечені паливом від європейських постачальників, однак прогнозують сезонне підвищення його вартості. Для забезпечення конкурентоспроможності необхідно постійно проводити аналіз цін на нафтопродукти та знаходити технічні та організаційні рішення щодо зниження витрат на паливну складову. Проведене дослідження цієї проблеми з використанням аналітичних та статистичних методів виявило суттєві зміни у структурі витрат та показало результативність запропонованих підходів до зменшення паливної складової, впровадження яких сприятиме стійкому стану автопідприємства на ринку перевезень. Подальші дослідження заплановано проводити у напрямку пошуків можливостей зниження інших вагомих статей витрат, таких як забезпечення рейсу та витрати на рухомий склад.

Список літератури:

1. Доброход С.О., Кость І.П. Організація міжнародних автоперевезень : навч. посіб. Львів : Вид-во «СПОЛОМ». 2007. 176 с. С. 82-91.
2. Пунь В.П. Збірник ексклюзивних інформаційно-аналітичних матеріалів з організації перевезень вантажів автомобільним транспортом у міжнародному сполученні. Київ: ДП «ДержавтотрансНДІпроект», 2008. 80 с. С. 10-18.
3. Петунін А., Ткачук Л. Дослідження ринку вантажних автомобільних перевезень за сучасних умов. 22.07.2016. *Каталог публікацій* Logist.FM. URL: <https://logist.fm/publications/doslidzhennya-rinku-vantazhnih-avtomobilnih-perevezen-ukrayini-za-suchasnih-umov>

4. Новицький О.В. Міжнародні перевезення : Методичні рекомендації до виконання технологічного розділу кваліфікаційної роботи бакалавра спеціальності 275 Транспортні технології. Дніпро. НТУ «Дніпровська політехніка». 2019. 29 с.
5. Сахно В.П., Шарай С.М., Мурований І.С., Поляков В.М. Дослідження факторів впливу на загальні витрати виконання оборотного рейсу у міжнародному сполученні з використанням математичної теорії експерименту. *Сучасні технології в машинобудуванні та транспорті*. 2021. №1. С. 159-167. <https://doi.org/10.36910/automash.v1i16.518>
6. Жадан М.І., Скидан О.О. Оптимізація структури витрат підприємства в собівартості послуг. *Сталий розвиток економіки*. Міжнародний науково-виробничий журнал. 2015. №3. С. 221-227. http://www.irbis-nbuv.gov.ua/cgi-bin/irbis_nbuv/cgiirbis_64.exe?C21COM=2&I21DBN=UJRN&P21DBN=UJRN&IMAGE_FILE_DOWNLOAD=1&Image_file_name=PDF/sre_2015_3_34.pdf
7. Даньків Й.Я., Остап'юк М.Я., Ценклер Н.І. Облік витрат і формування собівартості автотранспортних перевезень. *Матеріали I Міжнародної науково-практичної інтернет-конференції*. 2013. м. Мукачево. 246 с. С. 50-54. <https://dspace.uzhnu.edu.ua/jspui/handle/lib/9386>
8. Норми витрат палива і мастильних матеріалів на автомобільному транспорті (зі змінами, внесеними наказом Мінінфраструктури України від 24.01.2012 №36). <https://zakon.rada.gov.ua/rada/show/v0043361-98#Text>
9. Асоціація міжнародних перевізників України. Інформація по країнах. http://asmap.org.ua/index1.php?inc_file=countries/page2.php&id=12
10. Бензин в Європі. <https://autotravels.com.ua/petrol-europe>
11. Вартість дизельного палива на АЗС України. <https://index.minfin.com.ua/ua/markets/fuel/dt/>

Kunda N.T. OPTIMIZATION OF THE FUEL COMPONENT COSTS OF INTERNATIONAL ROAD TRANSPORTATION

The ability of a motor company to reduce the cost of transportation depends on its competitiveness in the international market of motor transport services. A significant cost item in the transportation of goods is the cost of the carrier to pay for fuel. The purpose of the article is to investigate changes in the structure of total costs and identify opportunities to reduce the fuel component. The structure of the total costs of the auto enterprise is analyzed, which are traditionally divided into direct, directly related to the execution of the road trip, and indirect – not related to the execution of a specific flight. The appropriate distribution of costs is given, indicating the specific weight of each item in the total amount of costs. It is noted that external factors significantly affected the cost of transportation and the cost structure itself. To study the changes in the structure, the performance indicators of 10 international flights with similar characteristics of transportation conditions and use of vehicles were analyzed. Significant differences from the typical distribution were found and a slightly different cost grid is presented, which better characterizes the execution of a particular transportation. However, as before, fuel and lubricants are the most important part of transportation costs. Minimization by rational selection of the volume and places of refueling is a simple way to reduce fuel costs, but it requires taking into account practical aspects, such as laying a route through a gas station where there are discounts on diesel fuel, using fuel cards, taking into account the mileage load. The example of a specific route shows that fuel costs can be halved through rational refueling. It is necessary to constantly analyze prices for petroleum products and find technical and organizational solutions to reduce the cost of the fuel component. The conducted research proves the effectiveness of the proposed approaches.

Key words: international road transportation, cost structure, cost items, fuel and lubricants, optimization.

Фомін О.В.

Державний університет інфраструктури та технологій

Баранов І.О.

ДВНЗ «Приазовський державний технічний університет»

Мірошникова М.В.

Східноукраїнський національний університет імені Володимира Даля

ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ БЕЗПЕЧНОЇ ЕКСПЛУАТАЦІЇ РУХОМОГО СКЛАДУ ЗАЛІЗНИЦЬ НА ОСНОВІ ОЦІНКИ РЕСУРСУ ЙОГО БАЗОВИХ ЧАСТИН

У роботі наведена методика обчислення ресурсу на основі виправленої лінійної гіпотези про накопичення пошкоджень у матеріалі. актуальне наукове обґрунтоване питання встановлення призначеного терміну служби локомотивів і вагонів, а також стала очевидною необхідність призначення термінів служби на основі розрахункового та експериментально підтвердженого ресурсу безпечної експлуатації об'єкта. При статичному навантаженні дослідження напружено-деформованого стану (НДС) можна проводити розрахунковими методами, зазвичай методом кінцевих елементів, що володіє достатньою для інженерної практики точністю. Оцінку характеристик НДС елементів конструкції виконують на основі сукупності наявних даних про фізико-механічні властивості матеріалів, конструктивні особливості, навантаження та впливів на об'єкт. Виконана розрахункова оцінка ресурсу базових частин рухомого складу залізниць. Визначені основні критерії обґрунтування міцності та ресурсу конструкції локомотивів і вагонів. Запропонована система розрахункових критеріїв, що відображає різноманітність механізмів деградації властивостей матеріалу конструкції в процесі виготовлення та експлуатації, яка використовується для отримання розрахункової оцінки працездатності та ресурсу конструкції базових частин рухомого складу. Для отримання розрахункової оцінки працездатності та ресурсу конструкції враховується система розрахункових критеріїв, що відображає різноманітність механізмів деградації властивостей матеріалу конструкції в процесі виготовлення та експлуатації: міцності, стійкості, довговічності, зростання тріщин втомі. У міру витрачання вихідного ресурсу конструкції, можливі заходи щодо його продовження. Побудована крива втомі деталей, яка характеризує накопичення втомних пошкоджень в матеріалі деталей, схильних до навантажень. Запропоновано визначення та облік у розрахунках ресурсу кількості циклів пошкодження операційних напружень відповідно до їх частки у фактичних реалізаціях процесів. Висвітлена залежність між коефіцієнтом запасу опору втомі та величиною еквівалентних динамічних напружень і залежність між коефіцієнтами запасу за напругою та довговічністю.

Ключові слова: рухомий склад, експлуатація, ресурс, безпека руху, управління ресурсом, динамічні напруження, довговічність.

Постановка проблеми. Досвід експлуатації відповідальних конструкцій показує, що за досягнутого рівня наукових розробок, технологічних та конструкторських рішень ще можливі пошкодження, відмови та аварії залізничного рухомого складу (РС).

Спроектвані, побудовані та прийняті в експлуатацію об'єкти відчувають різні зовнішні (природні та фізичні) та внутрішні (функціональні, технологічні) впливи. Несучі конструкції об'єктів деградують, зношуються, старіють, внаслідок чого їх експлуатаційні якості погіршуються і з часом перестають відповідати своєму призначенню [1, 2].

У зв'язку з одночасним збільшенням інтенсивності експлуатації та вагових норм поїздів, а також ситуація зі старінням парку рухомого складу, вимоги безпеки руху реалізують актуальне наукове обґрунтоване питання встановлення призначеного терміну служби локомотивів і вагонів, а також стала очевидною необхідність призначення термінів служби на основі розрахункового та експериментально підтвердженого ресурсу безпечної експлуатації об'єкта.

Під дією циклічних навантажень міцнісні властивості металу деталей і конструкцій екіпажної частини рухомого складу (рам візків, головних

рам і кузовів, деталей колісних пар та ін.) деградують, знижується їх опір втоми, підвищуються межа плинності, крихкість матеріалу, що може призвести їх руйнування [2].

В результаті, для об'єктів залізничної техніки, що тривало експлуатуються, виникає необхідність обґрунтування можливості їх подальшої надійної експлуатації. Це потребує встановлення фактичного технічного стану об'єктів з урахуванням накопичених у процесі експлуатації циклічних, тимчасових, корозійних пошкоджень та зношування. Крім цього необхідна оцінка впливу основних конструктивних та технологічних факторів, що змінюють властивості матеріалу та визначають настання граничних станів критичних елементів базових частин локомотивів та вагонів. На цій основі слід розробити методи оцінки, відновлення та прогнозування ресурсу.

Сучасний розвиток проблеми аналізу параметрів ресурсу, термінів служби, умов досягнень граничних станів елементів конструкції зумовлює необхідність удосконалення діючих традиційних підходів до забезпечення безпечної експлуатації об'єктів залізничного рухомого складу [2]. В їх основу має бути покладено принцип «безпечної експлуатації об'єкта за його технічним станом». Він визначає необхідність оцінки та моніторингу міцності та ресурсу як базові параметри стану аналізованого об'єкта на всіх стадіях життєвого циклу. Водночас вимоги до міцності, ресурсу та безпеки мають бути визначені та забезпечені на стадії проектування, перевірятися на стадії виготовлення та випробувань, підтримуватись у процесі експлуатації.

Об'єкти рухомого складу залізничного транспорту представляють собою складні багатовимірні системи з великою кількістю вхідних та вихідних параметрів зі складними лінійними та нелінійними зв'язками між ними та ознаками технічного стану з можливістю виникнення аварії за сценарієм, що вимагає оцінювати фактори, що виявляються на стадії початку переходу на новий режим або що дозволяють оцінити ймовірність такого переходу. Отже, попередження небезпечних процесів може бути ефективним лише за можливості здійснення своєчасної та об'єктивної оцінки систем, процесів та прогнозування їх майбутнього стану.

Для діагностування складних об'єктів використовують різні методи та засоби в основі яких лежить вимірювання фізичних параметрів, у тому числі прилади для визначення твердості та пружних констант матеріалів, машини для випробувань матеріалів на стискання, вигин, удар, зріз,

кручення тощо. Використання систем діагностики та розширеного моніторингу для контролю стану об'єктів рухомого складу вимагає не лише вміння вимірювати та подавати результати вимірювань. Розв'язання цього завдання вимагає глибоких знань конструкції об'єкта, властивостей його окремих вузлів та деталей, характеру робочих процесів та досвіду експлуатації.

Однак сучасний рівень діагностичних систем та інструментальних засобів контролю не має можливості раннього виявлення дефекту, не дозволяє відповісти на питання про наявність і реальні розміри дефекту, місце його розташування, не в змозі контролювати стан і якість зварних з'єднань і т.д. [3, 4].

Для аналізу стану елементів об'єктів рухомого складу необхідно застосування методів неруйнівних (контролю) та руйнівних випробувань, метою яких є не тільки виявлення дефектів, а й кількісна оцінка (розташування, тип та розміри), а також визначення властивостей металу конструктивних елементів у поточний момент часу. Дуже важливим є отримання такої інформації для своєчасного попередження ситуацій, які можуть створити загрозу життю та здоров'ю людини чи матеріальному майну [5, 6].

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Фундаментальні теоретичні розробки виконані на основі результатів досліджень вчених, які займалися вирішенням питань забезпечення безпечної експлуатації рухомого складу залізниць, серед них відомі вчені: Бабанін О.Б., Бутько Т.В., Жалкін Д.С., Калабухін Ю.Є., Крашенінін О.С., Мороз В.І., Пузир В.Г., Тартаковський Е.Д. та закордонні вчені: Аміні А., Барков О.В., Ванг Д., Гієв З.Г.

Вагомий внесок у розвиток теорії безпечної експлуатації рухомого складу залізниць внесли вчені: О.В. Гателюк, А.І. Мішин, В.В. Молчанов, С.М. Овчаренко, П.А. Сіряк, О. Усманов, В.В. Харламов та інші.

Метою статті є забезпечення безпечної експлуатації рухомого складу залізниць на основі розрахункової оцінки ресурсу його базових частин.

Викладення основного матеріалу дослідження. Відповідно до прийнятого базового підходу, оцінку ресурсу проводять за визначальними показниками технічного стану на основі встановлених закономірностей їх зміни, аналізу механізмів накопичення пошкоджень, зародження та розвитку дефектів, а також за даними зміни функціональних параметрів у міру експлуатаційного напрацювання.

При проектуванні конструкцій локомотивів та вагонів, міцність та ресурс обґрунтовують за критеріями:

- опору пружним та пластичним деформаціям при статичному навантаженні та накопиченим при циклічному навантаженні;
- опір руйнуванню по в'язкому або крихкому механізму;
- опір втоми;
- опір втрати стійкості;
- корозійно- та зносостійкості.

Міцність при статичному навантаженні та зносі конструкції з урахуванням корозійних пошкоджень забезпечується вибором матеріалу, а також коефіцієнтами запасу міцності елементів конструкції.

Конструкційні сталі, залежно від умов, можуть перебувати в крихкому або в'язкому стані. Якщо конструкція або деталь виконана з пластичного матеріалу (практично всі конструкційні матеріали), то крихке руйнування може реалізуватися тільки при напруженнях ($\sigma_{кр}$) нижче межі плинності за наступних умов:

- наявність у ній дефекту (порушення суцільності, тріщини тощо);
- коли вона стає чутливою до дефектів суцільності.

Таким чином, небезпека виникає тоді, коли дефекти суцільності досягають критичних розмірів і під дією зовнішнього навантаження стають нестійкими та починають швидко зростати.

При критичних напруженнях ($\sigma_{кр}$) що дорівнюють межі плинності матеріалу ($\sigma_{0,2}$) у деталі виникають невеликі пластичні деформації. В'язке руйнування відбувається з меншою швидкістю, характеризується напруженнями $\sigma_{кр} > \sigma_{0,2}$, і йому передують розвинені пластичні деформації.

Про настання граничного стану, вичерпання ресурсу та необхідність припинення експлуатації елементів рухомого складу можуть свідчити:

- поява на поверхні деталей (елементі конструкції) будь-яких тріщин;
- незворотні формозміни конструкції та її елементів, викликані пластичними деформаціями, не передбаченими проектною документацією та що призводять до виходу конструкції з ладу (відмови);
- перевищення рівня вимірювача (наприклад, кілометрів пробігу, тонно-кілометрів пропущеного залізничним шляхом тоннажу) або числа повторень (циклів) навантаження допустимого значення, визначеного на стадії проектування.

У разі передчасного вичерпання ресурсу експлуатації через недоліки конструкції, потрібна, як

правило, реконструкція (модернізація, вдосконалення). Недоліки (порушення норм) експлуатації можуть також суттєво скорочувати ресурс експлуатації та призводити до виникнення дефектів суцільності металу. Відновлення ресурсу в цьому випадку можливе з використанням ремонтної технології або шляхом заміни пошкодженого елемента конструкції. Узагальнений алгоритм робіт з оцінки та управління ресурсом представлений у формі блок-схеми рисунку 1.

Міцність та ресурс конструкції визначаються, головним чином, рівнем та характером механічних напружень. При статичному навантаженні дослідження напружено-деформованого стану (НДС) можна проводити розрахунковими методами, зазвичай методом кінцевих елементів, що володіє достатньою для інженерної практики точністю. Оцінку характеристик НДС елементів конструкції виконують на основі сукупності наявних даних про фізико-механічні властивості матеріалів, конструктивні особливості, навантаження та впливів на об'єкт. Для деталей складної форми, що мають концентратори напружень, що зазнають динамічних і температурних силових впливів, доцільні також експериментальні методи.

При можливості наявності у конструкції невиявлених пошкоджень, що розвинулися при експлуатації, ресурс конструкції визначається з урахуванням можливого зростання цих пошкоджень з використанням методів механіки руйнувань [7]. Завдання може вирішуватися, як у детермінованій, так і у ймовірнісній постановці. Використовуються результати дефектоскопічного контролю та металографічних досліджень, враховуються механічні властивості та граничні стани сталей, що використовуються, у широкому діапазоні статичних, циклічних та ударних впливів при температурах від +50 до -60°C.

Оцінка показників ресурсу об'єкта, що досліджується, полягає у розрахунково-експериментальному визначенні напрацювання об'єкта від початку експлуатації (початковий ресурс) чи моменту проведення відповідного планового контролю (залишковий ресурс) до моменту переходу в граничний стан [8]. Для оцінки рівня пошкоджень, вже накопичених конструкцією, та для отримання прогнозних оцінок використовуються дані про рівень навантаженості за попередній та на прогнозний період експлуатації.

Наведений алгоритм робіт щодо оцінки та управління ресурсом, також застосовується для визначення рівня пошкоджень конструкцій вантажних вагонів [9, 10].

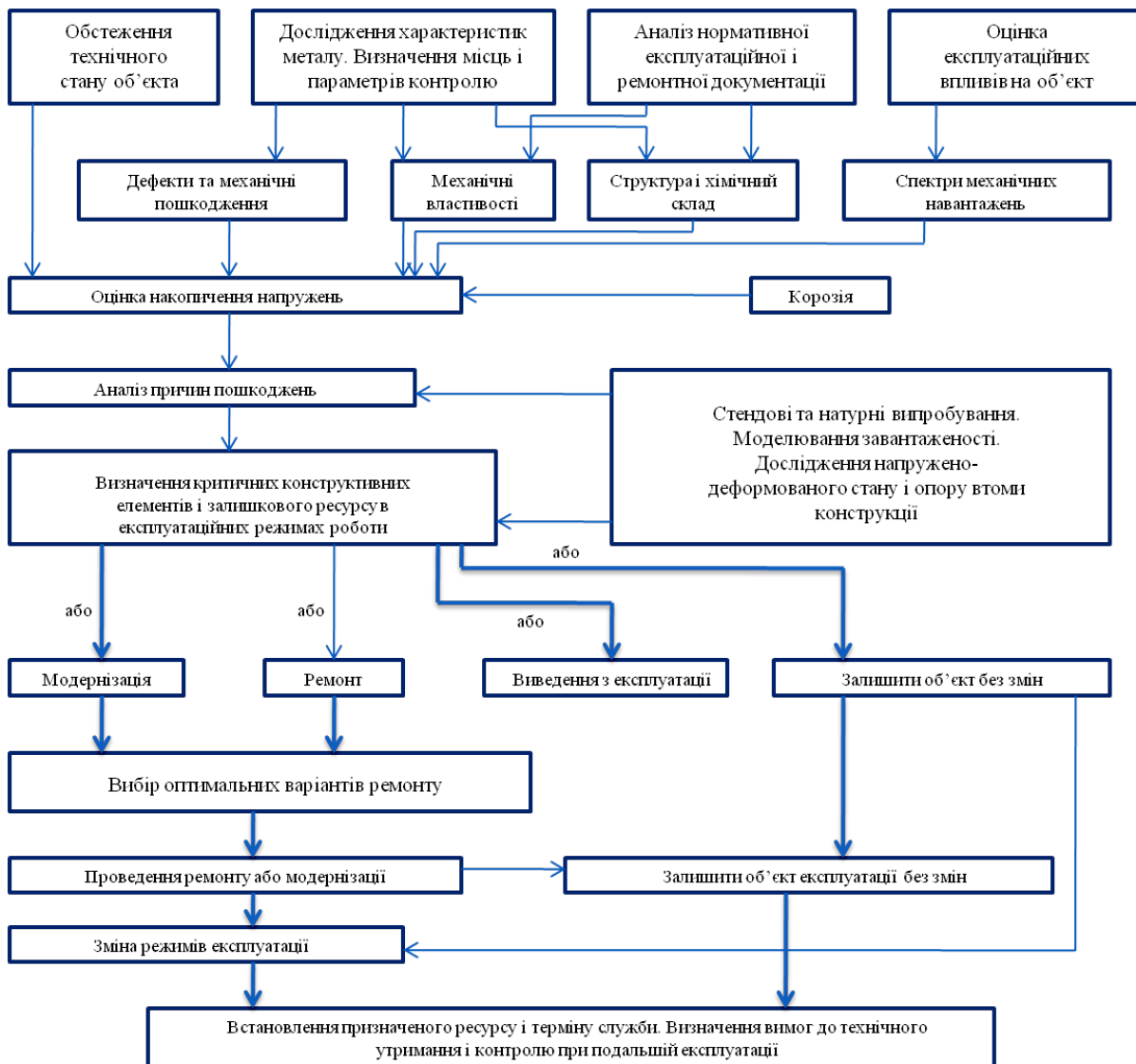


Рис. 1. Узагальнена структура (алгоритм) робіт з оцінки та управління ресурсом

Для отримання розрахункової оцінки працездатності та ресурсу конструкції враховується система розрахункових критеріїв, що відображає різноманітність механізмів деградації властивостей матеріалу конструкції в процесі виготовлення та експлуатації: міцності, стійкості, довговічності, зростання тріщин втомленості. У міру витрачання вихідного ресурсу конструкції, можливі заходи щодо його продовження. Ресурс може оцінюватися за часом експлуатації та за кількістю циклів впливу. При проектуванні зазвичай призначається термін служби. Його встановлюють за усередненими значеннями параметрів навантаженої, умов експлуатації, технологій утримання та ремонтів. Однак відомо, що, залежно від умов експлуатації, фактичний термін буває більшим і меншим. Змінюючи умови та режими експлуатації, проводячи

інші заходи, можна регулювати закладений під час проектування термін експлуатації.

Методологія та процедура визначення ресурсу конструкцій локомотивів та вагонів (вихідного, залишкового) характеризується такими основними положеннями [11]:

- аналіз технічної документації даних експлуатації;
- виявлення та аналіз пошкоджень, встановлення їх механізму та визначальних параметрів;
- експертне обстеження (контроль) технічного стану об'єкта, а також елементів несучих конструкцій та вузлів.

Експертне обстеження проводять з метою отримання інформації про фактичний технічний стан об'єкта на даний момент часу. Такою інформацією можуть бути:

- механічні характеристики матеріалів, такі як межа витривалості, межа плинності, межа міцності, твердість;
- геометричні розміри несучих конструкцій;
- результати розрахунково-експериментальних досліджень стану конструкцій;
- причини утворення та зростання виявлених тріщин, дефектів та ушкоджень.

Відповідно до результатів випробувань та розрахунків напружено-деформованого стану конструкцій та характеристик матеріалів уточнюються механізми пошкоджень та параметри технічного стану, визначаються критерії граничних станів. Залишковий ресурс конструкції визначається прогнозуванням його технічного стану до її граничного стану. Підбір методу розрахунку ресурсу визначається достовірністю та точністю одержуваних даних, а також вимогами достовірності та точності прогнозованого ресурсу конструкції та ризику його подальшої експлуатації, наявності системи контролю за його технічним станом. Основним показником ресурсу приймається гамма-відсотковий ресурс, що задається чисельними значеннями напрацювання (км пробігу, число циклів до руйнування) вираженої у відсотках ймовірності того, що протягом цього напрацювання граничний стан не буде досягнуто. Ця можливість визначається залежно від функціонального призначення, рівня відповідальності та режиму експлуатації об'єкта. Для унікальних та особливо відповідальних об'єктів, достроковий вихід із ладу яких може призвести до значних економічних втрат, її значення має становити не менше 99 %. Для об'єктів ремонту рекомендується визначати показник ресурсу до планового ремонту. Рішення про можливість подальшої експлуатації такого об'єкта або його ремонт, зниження робочих параметрів, модернізацію, списання приймається на підставі даних щодо оцінки технічного стану об'єкта та ресурсу.

Накопичення втомних пошкоджень в матеріалі деталей, схильних до багато циклового навантаження у гігацикловій ($N_G \gg N_0$) області (таких як шкворневий вузол, рама візка, вісь і колесо колісної пари та ін..) характеризується кривою втоми, представленою двома похилими гілками (рис. 2). Вони представляються рівняннями виду $\sigma_{ai}^m \cdot N_i = const$ згідно гіпотезі лінійного сумування ушкоджень [12, 13].

З рівняння другої похилої гілки кривої втоми:

$$\sigma_{-1e}^{m_2} \cdot N_0 = \sigma_{ae}^{m_2} \cdot N_p \quad (1)$$

Знаходимо

$$N_p = \left(\frac{\sigma_{-1e}}{\sigma_{ae}} \right)^{m_2} \cdot N_0 = n_\sigma^{m_2} \cdot N_0 \quad (2)$$

де m_2 – показник нахилу кривої втоми (при відомій величині m_1 , $m_2 = 2m_1 - 1$);

N_p – кількість циклів навантаження конструкції до граничного стану;

σ_{-1e} – межа витривалості деталі для заданої ймовірності не руйнування (P);

$\bar{\sigma}_{-1e}$ – середнє значення межі витривалості.

$$\sigma_{-1e} = \bar{\sigma}_{-1e} (1 - U_p \cdot \vartheta_{-1}) \quad (3)$$

$N_0 = 5 \cdot 10^6 \dots 10^7$ – кількість циклів, відповідна фактичній точці зламу кривої втоми;

σ_{ae} – еквівалентна амплітуда динамічних напружень в конструкції від напружень, які виникають при русі рухомого складу.

$$\sigma_{ae} = \sqrt[m]{\frac{N_\Sigma}{N_0}} \left[\sum (K_{yuj} P_{vi} \cdot \sum \sigma_{ai}^m \cdot P_{oi}) \right] \quad (4)$$

де m – показник нахилу кривої втоми (для зварювальних конструкцій $m=4-6$);

Сумарна кількість циклів напружень від дій експлуатаційних навантажень за термін служби (років):

$$N_\Sigma = f_e \cdot \frac{365 \cdot 10^3}{V} \cdot L \cdot \tau_{ec}^p \quad (5)$$

K_{yuj} – середня частка протяжності ($j=1$), кривих ділянок шляху ($j=2$) і стрілок ($j=3$) в загальній довжині залізничних колій.

Ефективна частота процесу навантаження, враховуючи частки кожного рівня частоти f_i на кожній швидкості руху:

$$f_e = \sum f_i \cdot P_{vi} \quad (6)$$

L – середньодобовий пробіг рухомого складу, км/год.;
 V – розрахункова середня технічна швидкість руху, м/с;

P_{vi} – частка руху локомотиву з i -ю швидкістю;

P_{oi} – ймовірність появи амплітуди напруження i -го рівня.

Розрахувавши коефіцієнт запасу опору втоми \bar{n}_σ і прийняв його за середнє значення, визначимо величину n_σ із заданою ймовірністю (надійністю).

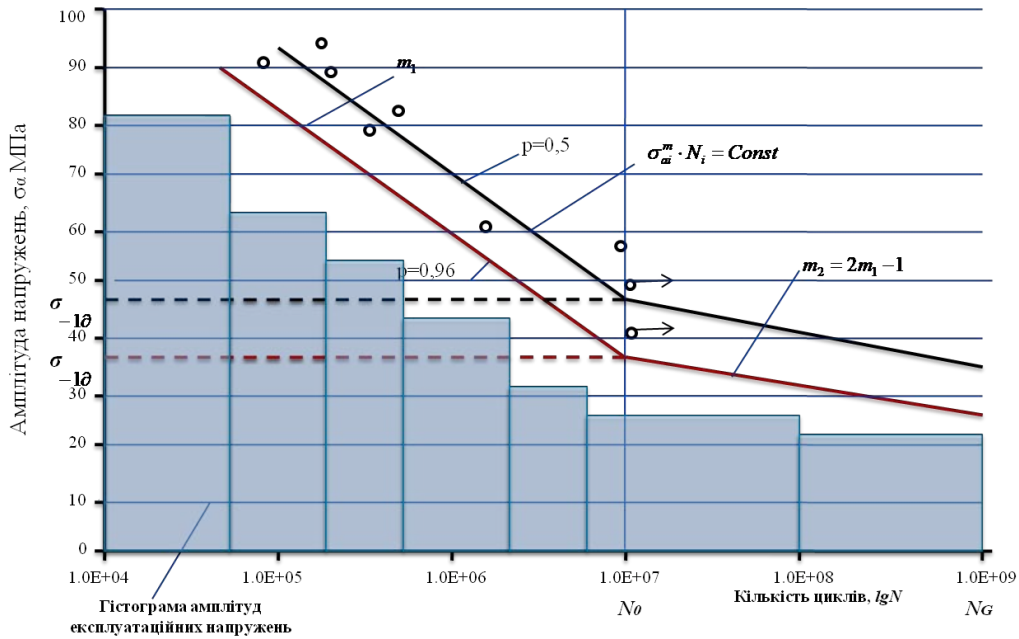
При збільшенні N_Σ підвищується рівень σ_{ae} , що призводить до зменшення коефіцієнта запасу n_σ (рис. 3).

Визначаємо відповідний запас за довговічністю n_N за залежністю $n_N = f(n_\sigma)$ (рис. 4), допустиме число циклів навантаження деталі (ресурс за числом циклів):

$$[N] = \frac{N_p}{n_N} \quad (7)$$

Визначаємо строк безпечної експлуатації рухомого складу. При річному пробігу $L_1 = L \cdot 365$, і відповідній кількості циклів $N_1 = 10^3 \cdot f / V$ знаходимо:

$$[\tau_e] = \frac{[N]}{N_1} \text{ років.} \quad (8)$$



Характеристика навантаженості деталі:
 m_1, m_2 – показники кута нахилу кривої в томи; N_0, N_G – бази випробувань;
 $\sigma_{1-\delta}$ – межі витривалості деталі при ймовірності неруйнування
 $P=0,5$ і $P=0,96$ відповідно

Рис. 2. Крива втоми

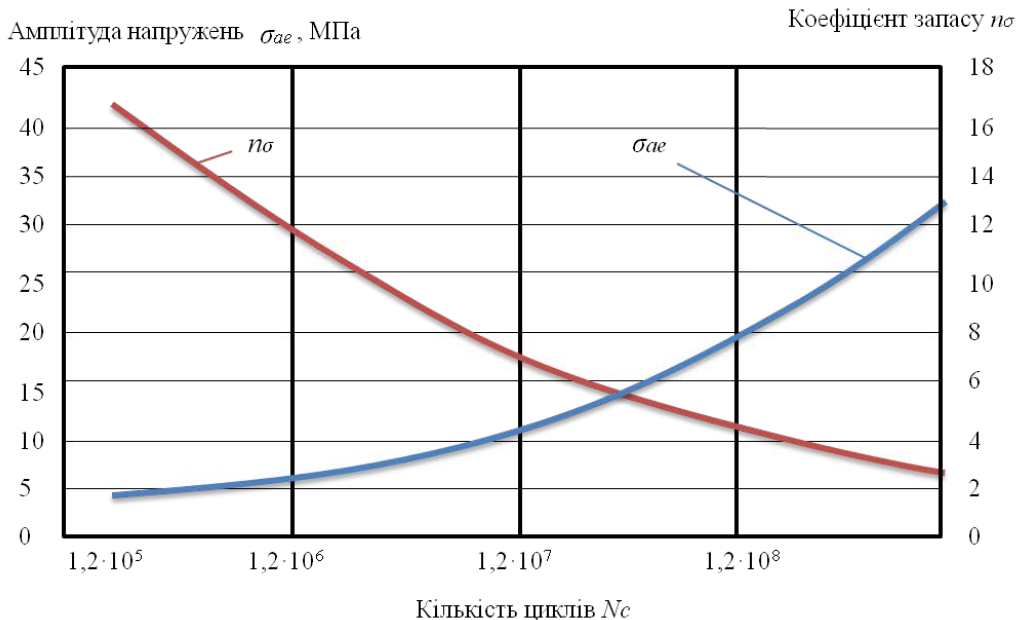


Рис. 3. Залежність між коефіцієнтом запасу опору втоми та величиною еквівалентних динамічних напружень

Пропоновані методи можуть використовуватися для розрахунку ресурсу деталей на стадії проектування та в процесі експлуатації з метою

оцінки залишкового ресурсу та встановлення продовженого терміну служби. Важливим фактором накопичення пошкоджень у конструкціях вантаж-

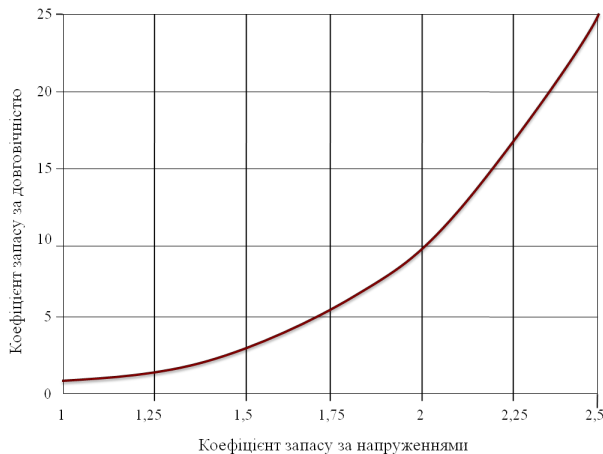


Рис. 4. Залежність між коефіцієнтами запасу за напруженнями та довговічністю

них вагонів є ударні навантаження, тому у вагонобудуванні для визначення терміну служби (T_k) застосовується формула:

$$T_k = \frac{\left(\frac{\sigma_{aN}}{[n]}\right)^{m_i} \cdot N_0}{N_{c1} \sum_j (\sigma_{aj})^{m_j} \cdot P_{cj} + N_{c2} \sum_i (\sigma_{ai})^{m_i} \cdot P_{ci}} \quad (9)$$

де N_{c1} – кількість циклів амплітуд динамічних напружень (σ_{aj}) в елементах, що досліджуються, конструкції вагону, наведених до еквівалентного

симетричного циклу виходячи з ушкоджуючої дії нормативного розподілу поздовжніх сил за один рік експлуатації;

N_{c2} – кількість циклів амплітуд напружень (σ_{ai}) від динамічних впливів при русі вагону за один рік експлуатації;

σ_{aN} – межа витривалості елемента конструкції, що досліджується;

$[n]$ – допустимий коефіцієнт запасу опору втоми елемента конструкції, що досліджується.

Висновки. В роботі запропоновані методи обчислення ресурсу на основі виправленої лінійної гіпотези про накопичення пошкоджень у матеріалі:

- відповідно до допустимої ймовірності руйнування за допомогою вторинної кривої втоми з горизонтальною або похилою правою гілкою, враховуючи дисперсію параметрів навантаження та характеристики опору втоми матеріалу;

- на основі аналітичного вирішення рівняння кривої втоми, представленого двома похилими гілками, що характеризують накопичення пошкодження на різних ділянках навантажувальних деталей. Запропоновано визначення та облік у розрахунках ресурсу кількості циклів пошкодження операційних напружень відповідно до їх частки у фактичних реалізаціях процесів.

Список літератури:

1. Візник Р. І., Чепурченко І. В., Яценко А. О. Особливості визначення експлуатаційних навантажень кузова напіввагона та шляхи удосконалення його конструкції з метою забезпечення міцності і збереження. Збірник наукових праць УкрДУЗТ. 2016. Вип. 159. С. 91–97.
2. Дьомін, Р. Ю. Розвиток методів і засобів досліджень з убезпечення технічної експлуатації залізничного рухомого складу: автореф. дис. ... д-ра техн. наук: 05.22.07. Сєверодонецьк, 2018. 40 с.
3. Кебал Ю. В., Шатов В. А., Тьокотев О. М., Мурашова Н. Г. (2017). Удосконалення конструкції вагона-хопера для перевезення зерна. Збірник наукових праць ДЕГУТ. Серія «Транспортні системи і технології». Вип. 30. С. 113–122.
4. Кельріх М. Б., Федосов-Ніконов Д. В. Дослідження на міцність конструкції довгобазної платформи. Вісник Східноукраїнського Національного університету імені Володимира Даля. 2016. № 1 (225). С. 90–94.
5. Ловська А. О., Фомін О. В., Рибін А. В. Визначення навантаженості рами напіввагона із замкненою конструкцією хребтової балки. Збірник наукових праць Національного університету кораблебудування імені адмірала Макарова. 2021. № 2 (21). С. 12–19.
6. Ловська А. О., Фомін О. В., Рибін А. В., Лебідь Г. О. Визначення динамічної навантаженості напіввагона з замкненою хребтовою балкою, заповненою наповнювачем. Вчені записки Таврійського національного університету імені В. І. Вернадського. Серія: Технічні науки. Том 32 (71). № 4, 2021. С. 255–259.
7. Сучасні технології в науці та освіті. Колективна монографія / під. ред. О. Б. Целіщева, Г. О. Татарченко, Г. М. Хорошун. – Сєверодонецьк: вид-во СНУ ім. В. Даля, 2021. – 320 с. doi: [https://doi.org/10.33216/MonographSNU\(978-617-11-0211-8\)-2021-320](https://doi.org/10.33216/MonographSNU(978-617-11-0211-8)-2021-320)
8. Федосов-Ніконов Д.В. Покращення міцнісних якостей довгобазних вагонів-платформ шляхом удосконалення їх конструкцій та методів розрахунків: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.22.07. Київ, 2018. 23 с.
9. Фомін О. В., Ловська А. О. Визначення вертикальних прискорень несучої конструкції вагона-платформи з в'язкими зв'язками у поздовжніх балках. Вчені записки Таврійського національного університету імені В. І. Вернадського. Серія: Технічні науки. – 2021, Том 32 (71). № 1, Частина 2, С. 135–140.

10. Фомін О. В., Ловська А. О., Рибін А. В. Дослідження динамічної навантаженості та міцності рами напіввагона з замкненою конструкцією хребтової балки. III International Scientific and Practical Conference: SCIENCE, EDUCATION, INNOVATION: TOPICAL ISSUES AND MODERN ASPECTS. (Tallinn, June 25-26). Tallinn, 2021. P. 255–257.
11. Hecht Markus. Innovative rail freight wagons - A precondition to increase the market-share of rail freight / Markus Hecht // Archives of Transport. – 2015. – Vol. 29 (1). – Pp. 17–26.
12. Płaczek M., Wróbel A., Buchacz A. (2016). A concept of technology for freight wagons modernization. IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering, Vol. 161. doi:10.1088/1757-899X/161/1/012107.
13. Wiesław Krasoń, Tadeusz Niezgoda, Michał Stankiewicz. Innovative Project of Prototype Railway Wagon and Intermodal Transport System. Transportation Research Procedia. 2016. Vol. 14. P. 615–624.

Fomin O.V., Baranov I.O., Miroshnykova M.V. ENSURING SAFE OPERATION OF RAILWAY ROLLING STOCK BASED ON ASSESSMENT OF THE RESOURCE OF ITS BASIC PARTS

The work presents the method of calculating the resource based on the corrected linear hypothesis about the accumulation of damage in the material. an actual scientifically substantiated issue of determining the designated service life of locomotives and wagons, as well as the need to determine the service life on the basis of the estimated and experimentally confirmed resource of safe operation of the object became obvious. Under static loading, the study of the stress-strain state (STS) can be carried out by calculation methods, usually the finite element method, which has sufficient accuracy for engineering practice. The assessment of the VAT characteristics of structural elements is performed on the basis of a set of available data on the physical and mechanical properties of materials, structural features, loads and effects on the object. A calculated estimate of the resource of the basic parts of the rolling stock of railways was made. The main criteria for substantiating the strength and resource of the design of locomotives and wagons are defined. A system of calculation criteria is proposed, which reflects the variety of mechanisms of degradation of the properties of the construction material during the manufacturing and operation process, which is used to obtain a calculation estimate of the performance and resource of the design of the basic parts of the rolling stock.

A system of calculation criteria is taken into account to obtain an estimate of the workability and resource of the structure, which reflects the variety of mechanisms of degradation of the properties of the structure material in the process of manufacture and operation: strength, stability, durability, growth of fatigue cracks. As the initial resource of the structure is used up, measures to extend it are possible. The fatigue curve of parts is built, which characterizes the accumulation of fatigue damage in the material of parts subject to loads. It is proposed to determine and take into account in resource calculations the number of damage cycles of operational stresses in accordance with their share in the actual implementation of processes. The relationship between the fatigue resistance reserve factor and the value of the equivalent dynamic stresses and the relationship between the stress reserve factor and durability are highlighted.

Key words: rolling stock, operation, resource, traffic safety, resource management, dynamic stresses, durability.

Шибасєв О.Г.

Одеський національний морський університет

Коскіна Ю.О.

Одеський національний морський університет

Кравченко О.А.

Одеський національний морський університет

Акімов К.С.

Одеський національний морський університет

ВАНТАЖОПОТОКИ ВУГІЛЛЯ В УКРАЇНСЬКИХ ПОРТАХ: РЕТРОСПЕКТИВНИЙ ОГЛЯД ТА СУЧАСНИЙ СТАН

У статті подано огляд ситуації на ринку перевалки вугілля українськими портами останніх передвоєнних років у порівнянні із періодом до 2014 р. Знаходження значної кількості потужних підприємств вугільної галузі на територіях, які не є підконтрольними українській владі, а також політична ситуація, зумовлена подальшою агресією росії, призвела до змін обсягів, динаміки та географії зовнішньоторговельних поставок вугілля. Суттєвих змін відповідно зазнали обсяги, динаміка та напрямки перевалки вугілля вітчизняними портами. Встановлено, що, починаючи з 2014 р., обсяги імпорту вугілля через морські порти значно переважають обсяги перевалки вугілля у експорті – на тлі зменшення загальних обсягів перевалки вугілля уп'ятеро. Значну роль у збільшенні «морського» імпорту вугілля відіграли й зміни, пов'язані зі змінами географії імпорту – у великих обсягах вугілля надходить в Україну морськими суднами з ПАР, США, Австралії на відміну від поставок з рф, які здійснювались залізницею. Частка вугілля у загальному вантажообігу портів також впала з приблизно 12% у період до 2014 р. до трохи більше за 2% останніми роками, що власне є логічним наслідком зменшення обсягів вантажопотоків. Визначено, що основними «вугільними» портами нашої країни є Маріуполь, Південний, Ізмаїл, Чорноморськ, Миколаїв із певною «спеціалізацією» за напрямками відвантажень (експорт або транзит – у довоєнні часи). Названі порти забезпечують вантажообіг українських портів за вугіллям більше, ніж на 90%. Останніми роками, враховуючи зміни у напрямках перевалки вугілля, вітчизняні порти працювали здебільшого із імпортом вугіллям. Огляд, поданий у статті, обмежується статистичними даними по 2021 р. включно, адже офіційні статистичні дані за період січень-лютий 2022 р. відсутні, а з лютого 2022 р. вітчизняні порти, як відомо, працюють у обмеженому режимі.

Ключові слова: вугілля, вантажопотоки, морський транспорт, українські порти, перевезення, судна.

Постановка проблеми. Значні зміни, яких зазнала вугільна галузь нашої країни, починаючи з 2014 р. – із початком бойових дій на сході країни, де зосереджено основні вугільновидобувні підприємства, суттєво відобразилась на обсягах та напрямках перевалки вугілля портами України. Власне, війна, яка розпочалась на теренах Донбасу та продовжилась повномасштабним вторгненням рф у лютому 2022 р., призвела до зміни структури зовнішньоторговельних операцій нашої країни із вугіллям. У свою чергу, це відобразилось і на транспортній галузі, зокрема – на морських портах, насамперед – у частині обсягів, напрямків та динаміки вантажопотоків вугілля.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Важливість морських портів як елементів транспортної системи країни, які забезпечують реалізацію зовнішньоторговельного обігу, передвизначила високу зацікавленість у оцінці їх роботи з боку фахівців транспортної галузі. Ряд публікацій визначають їх загальну роль у транспортному забезпеченні зовнішньої торгівлі [1–6] із наголосом у окремих публікаціях на вплив зовнішніх факторів на сучасний стан вітчизняних портів [7–10]. Вантажну базу портової складової морської галузі нашої країни традиційно формують вантажі, які є основною української зовнішньої торгівлі – зерно, метал, руди, добрива [11], на чому зосереджено увагу у дослідженнях зовнішньоторговельної діяльності нашої країни [12–14]. Втім, детальному розгляду окремих категорій вантажів, що перевалюються морськими портами нашої країни, присвячено незначну кількість публікацій. Так, у [15] подано огляд динаміки та напрям-

ків відвантажень зернової продукції – основного товару вітчизняного експорту; за рештою вантажів можна знайти лише окремі згадки у публікаціях, присвячених обсягам та структурі вантажопотоків вітчизняних портів взагалі [16–18] або ж у новинних стрічках [19–21]. **Метою статті** є аналіз структури вантажопотоків та динаміки перевалки українськими портами вугілля з урахуванням змін, яких зазнала вугільна галузь нашої країни, що у свою чергу, разом із політичними факторами, спричинило і зміни у структурі зовнішньоторговельних операцій.

Виклад основного матеріалу. Вітчизняний вугільний ринок зазнав значних змін [22], що логічно відобразилось на морській транспортній інфраструктурі нашої країни. Як можна переконатися з поданого далі рис. 1, якщо у період 2013–2014 рр. обсяги імпорту становили приблизно 14,5 млн. т на рік, то вже наступними роками (зокрема, 2015–2016 рр.) вони вирости майже на 1 млн. т та сягнули позначки у 15,65 млн. т [23]. Надалі тенденція збільшення обсягів закупівель вугілля на зовнішніх ринках закріплювалась та характеризувалась постійним зростанням обсягів, сягнувши у період 2020–2022 рр. 20 млн. т на рік [24].

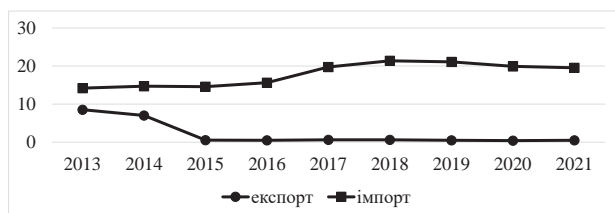


Рис. 1. Обсяги зовнішньоторговельних поставок вугілля, млн. т

Враховуючи також і географічну переорієнтацію вугільних товаропотоків (зокрема, значну роль у забезпеченні вугіллям нашої країни стали відігравати країни, відокремлені від України морем – США, Австралія, ПАР), логічними виглядають і зміни напрямків та обсягів перевалки вугілля українськими портами. Саме вони стали тієї ключовою ланкою систем доставки, які забезпечують імпорт вугілля до нашої країни. За період 2017–2021 рр. обсяги відвантажень впали майже учетверо, про що свідчать дані поданого далі рис. 2.

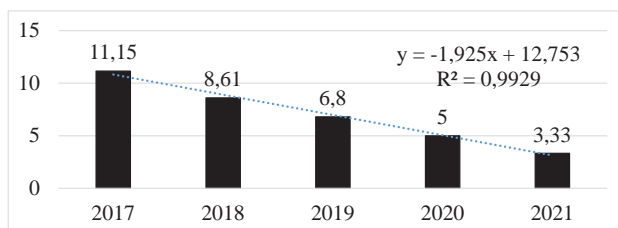


Рис. 2. Обсяги перевалки вугілля в українських портах, млн. т

У порівнянні із періодом до 2014 р. обсяги перевалки були значними, але лише перший з досліджуваних років (2017 р.) за обсягами перевалки може бути зіставлений із попереднім періодом часу, щорічні обсяги перевалки у якому подано далі у табл. 1.

Таблиця 1

Обсяги перевалки вугілля українськими портами, млн. т	2007	2008	2009	2010	2011	2012
	15,78	17,34	12,51	12,4	12,42	11,08

Значні обсяги вугільних вантажопотоків у абсолютному вимірюванні забезпечували у той період часу їх досить вагому частку – 13–14% усіх вантажів, які перероблюються портами (табл. 2), при цьому ця частка була досить стабільною по роках.

Таблиця 2

Частка вугільних вантажів у загальному обсязі перевалки, %	2007	2008	2009	2010	2011	2012
	12,75	13,1	11,4	11,52	10,9	10,1

Стійке падіння обсягів перевалки вугільних вантажів на тлі постійного росту перевалки вантажів загалом по портах, зрозуміло, призвело до падіння частки вугілля у загальному вантажообороті: на сьогодні частка вугільних вантажів, включаючи кокс, демонструє тенденцію стабільного падіння: з майже 8,5% загальнопортового вантажообігу у 2017 р., надалі вона щороку втрачає приблизно по 2–2,25%, що призвело до того, що за результатами 2021 р. вона ледь перевищила 2%.

Минулими часами вугільні вантажопотоки, які проходили через причали вітчизняних портів, характеризувались вивізною спрямованістю, оскільки загальна частка вивозу (експорту і експортного транзиту) коливалась у межах 95–98%, а переробка імпортного вугілля та вугілля, яке перевозилось у каботажі, здійснювалась у вкрай незначних обсягах. У середньому співвідношення «експорт-транзит» у напрямках відвантаження вугілля становило приблизно 30:70 (частки імпортного вугілля та внутрішніх перевезень вугілля настільки мізерні, що ними можна знехтувати).

Сьогодні у перевалці портів ситуація цілком протилежна – лівова частка вугілля, що перевалюється вітчизняними портами, є вугілля, яке наша країна імпортує (табл. 3), у обсягах, які подано на рис. 3.

Таблиця 3

Частка імпортного напрямку у перевалці вугілля, %

Імпортне вугілля у портах	2017	2018	2019	2020	2021
	56,0	72,5	96,5	93,4	91,3

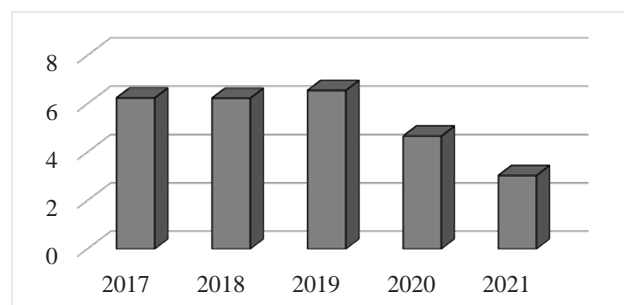


Рис. 3. Перевалка імпортного вугілля у портах України, млн. т

У той самий час вітчизняні порти мають технологічні можливості перероблювати значні обсяги вугілля. До повномасштабного вторгнення перевалкою вугілля опікувались такі українські порти, як Маріуполь, Південний, Ізмаїл, Чорноморськ, Миколаїв (табл. 4), сумарна частка перевалки вугілля якими сягала 95–97% загального вугільного вантажообороту, а за результатами останнього передвоєнного року навіть перевищила 98%. Беззаперечність лідерських позицій на ринку перевалки вугілля підтверджується і фізичними обсягами перевалки названими портами цього вантажу (рис. 4).

Таблиця 4

Частки участі вугільних портів у перевалці вугілля, %

Порти	2017	2018	2019	2020	2021
Ізмаїл	10,26	9,26	3,28	3,8	4,8
Миколаїв	12,11	3,7	4,47	2,4	-
Маріуполь	7,76	4,2	12,0	4,0	12,0
Південний	66,1	76,5	64,2	78,0	85,0
Чорноморськ	3,33	3,7	14,9	5,2	6,45

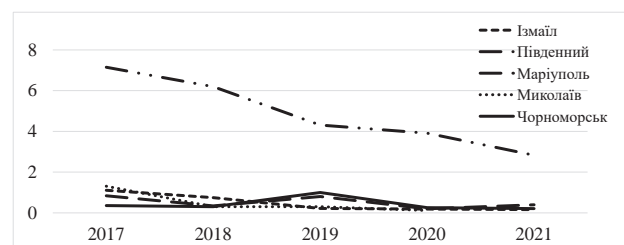


Рис. 4. Обсяги перевалки вугілля основними вугільними портами України, млн. т

Подані дані переконливо засвідчують, що, якщо по інших портах обсяги перевалки вугілля утримуються для кожного порта приблизно на одних і тих

самих позначках, то для порту Південний є набагато вищими. Дійсно, лівова частка цього вантажу проходить саме через причали терміналів, які розташовані та функціонують у цьому порту.

Свого часу зазначена вище «вивізна» спрямованість вантажопотоків вугілля у вітчизняних портах відобразилась і на їх у певному сенсі спеціалізації за напрямками відвантажень. Так, порт Миколаїв був транзитно-орієнтованим, по окремих роках за обсягами перевалки транзитного вугілля він навіть випереджав традиційного лідера – Південний порт, перевалюючи до чверті транзитного вугілля. У доволі значних обсягах транзитне вугілля відвантажувалось на морські судна і у Ізмаїлі, де частка транзитного напрямку у загальному вугільному вантажопотоці сягала 50%. Решта становила експорт. Тобто фактично цей порт працював 50:50. Втім, ці частки також по окремих роках коливались від 40% до 60%, забезпечуючи і зміну вказаного співвідношення. Беззаперечним лідером за обсягами перевалки транзиту був Південний порт, який працював на перевалці російського вугілля з Кузбасу. Наразі і за перевалкою вугілля на експорт цей порт обіймає лідируючі позиції.

Традиційно експортно-орієнтованим портом з відвантаження вугілля був Маріуполь, який зайняв цю нішу на ринку портового бізнеса ще за часів існування радянського союзу та міцно утримував її тривалий час. Завантажені вугіллям морські судна з цього порту прямували на Болгарію, Туреччину, Іспанію. У середньому порт забезпечував завантаження на судна біля 40–45% загального експортного вугільного вантажопотоку.

Зрозуміло, що за ситуації, яка склалась на сьогодні на вугільному ринку України, коли поставки на «вивіз» змінились імпортними надходженнями, порти переорієнтували свої потужності на прийом суден із вантажем вугілля та його розвантаження. Із транзитним вугіллям працює лише Ізмаїльський порт, і на сьогодні це єдиний український порт, який перевантажує на морські судна вугілля, що транзитом проходить нашою країною (табл. 5).

Таблиця 5

Перевалка транзитного вугілля, млн. т

Показник	2017	2018	2019	2020	2021
Усього	4,43	2,21	0,22	0,19	0,16
Ізмаїл	0,96	0,75	0,22	0,19	0,16
Південний	2,22	1,22	-	-	-
Миколаїв	1,22	0,23	-	-	-

Цілком втратив транзитний (доволі потужний за обсягами) вантажопоток вугілля порт Південний. Не вдалося зберегти вантажопоток транзит-

ного вугілля і порту Миколаїв – його обсяги були значно меншими порівняно із обсягами Південного, втім, свій внесок у перевалку транзитного вугілля на морські судна протягом 2017-2018 рр. порт все-ж таки робив, наразі наступними роками припинив працювати із цим вантажем.

Зрозуміло, що порти, реагуючи на потреби ситуації, переорієнтувалися на обробку суден, які прибувають із вугіллям на борту. Левова частка вітчизняного вугільного імпорту проходить через Південний порт: з, наприклад, 3 млн. т, завезених через морські порти нашої країни, 2,79 млн. т було розвантажено з суден саме у цьому порту. Значно меншими за обсягами і за частками (рис. 5) є перевалка імпортного вугілля у портах Маріуполь та Чорноморськ.

По порту Чорноморськ обсяги перевалки коливаються на рівні приблизно 0,25 млн. т на рік із невеликими відхиленнями, не враховуючи лише 2019 р., коли у порту було розвантажено майже 1 млн. т цього вантажу. Щодо Маріуполя, то тут динаміка перевалки вугілля вкрай не стабільна та «стрибає» від 0,8 млн. т до 0,15 млн. т по окремих роках.

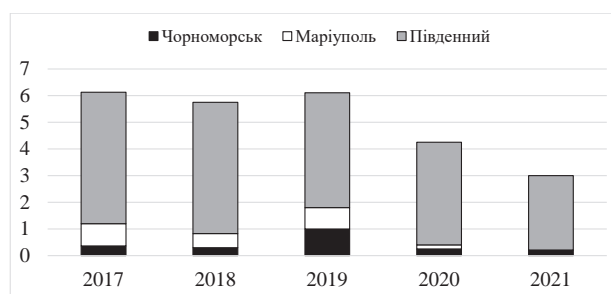


Рис. 5. Обсяги перевалки імпортного вугілля по портах України, млн. т

Висновки. Структура та обсяги перевалки вугілля українськими портами суттєво змінилися за останні 10 років, що вочевидь пов'язано зі змінами у обсягах експортно-імпортних операцій та географії поставок. Зміна «вивізних» напрямків перевалки вугілля на імпортний призвела до падіння загальних обсягів вугілля у морських портах нашої країни. Як такі, що традиційно були орієнтовані на відвантаження вугілля на морські судна, вітчизняні порти наразі швидко переорієнтувались, прилаштовуючись під обставини, та оброблюють судна із вугіллям, яке наша країна імпортує для власних потреб.

Список літератури:

1. Логутова Т.Г., Полторацький М.М. Морські порти як ключові логістичні центри у розвитку світової торгівлі. *Науковий вісник Ужгородського національного університету. Серія: Міжнародні економічні відносини та світове господарство*. 2018. Вип. 20, ч. 2. С. 96-101.
2. Янковський В.А. Морські портова галузь України: сучасний стан, проблеми та перспективи реформування. *Економіка та управління підприємствами. Східна Європа: економіка, бізнес та управління*. 2021. Вип. 1(28). С. 48-51. <https://doi.org/10.32782/easterneurope.28-9>
3. Стасюк О.М., Чмирьова Л.Ю., Федяй Н.О. Ринки вантажних та пасажирських перевезень в Україні: проблеми та тенденції. *Ефективна економіка*. 2020. №. 9. URL: http://www.economy.nayka.com.ua/pdf/9_2020/56.pdf (дата звернення 15.07.2022). DOI: 10.32702/2307-2105-2020.9.54
4. Свірідова С., Захарченко Ю. Основні шляхи та резерви потенціалу розвитку морських портів України. *Економіка: реалії часу*. 2021. Вип. 5 (57). С. 91-98. DOI: 10.15276/ETR.05.2021.11 DOI: 10.5281/zenodo.6075998
5. Болвановська Т.В., Боричева С.В., Германюк Ю.М. Дослідження динаміки зміни обсягів перевезення вантажів залізничним та морським транспортом у міжнародному сполученні. *Транспортні системи і технології перевезень : зб. наук. пр. Дніпров. нац. ун-ту залізн. трансп. ім. акад. В. Лазаряна*. 2019. Вип. 18. С. 16–22. DOI: 10.15802/tstt2019/182577
6. Коскіна Ю.О. Сучасний стан транспортного забезпечення морського експорту України. *Збірник наукових праць ДУІТ. Серія «Транспортні системи і технології»*. 2019. Вип. 33. Т. 2. С. 145-155. DOI: 10.32703/2617-9040-2019-33-2-14
7. Решетков Д.М., Павлова Н.Л. Вплив пандемії COVID-19 на роботу морських портів. *Вчені записки ТНУ імені В.І. Вернадського. Серія: Технічні науки*. 2021. Т. 32 (71), № 6. С. 231-238. DOI <https://doi.org/10.32838/2663-5941/2021.6/37>
8. Репін К. Третина аграрного експорту – залізницею та автомобілями. Як за час війни змінилась експортна логістика української агропродукції. *Порти України*. 2022. № 4-5. С. 76-79.
9. Горошкова Л. А., Васильєва О. О., Маслова О. В., Сумець О. М. Річкова логістика в умовах війни та повоєнного відновлення України: стан та перспективи. *Економічна теорія*. 2023. Вип. 56. С. 113-125. <https://doi.org/10.31470/2306-546X-2023-56-113-125>
10. Щербина В.В. Проблеми та перспективи розвитку морської торгівлі в умовах пандемії COVID-19. *Розвиток методів управління та господарювання на транспорті*. 2021. № 3 (76). С. 74-91. DOI 10.31375/2226-1915-2021-3-74-91

11. Вернигора Р.В., Золотаревська О.Р. Аналіз сучасної взаємодії залізниць та морських портів України. *Транспортні системи і технології перевезень* : зб. наук. пр. Дніпров. нац. ун-ту залізн. трансп. ім. акад. В. Лазаряна. 2021. Вип. 21. С. 49–59. <https://10.15802/tsst2021/237661>
12. Гринь В.П., Ільченко Д.А. Аналіз тенденцій динаміки обсягів та структурних змін у зовнішній торгівлі України. *Приазовський економічний вісник*. 2019. Вип. 2 (13). С. 53-57.
13. Пилипяк О.В., Лабунець О.О. Розвиток зовнішньоекономічної діяльності Причорноморського регіону. *Причорноморські економічні студії*. 2018. Вип. 27 (1). С. 24-28.
14. Ус І.В. Тенденції зовнішньої торгівлі товарами України за підсумками 2021 року. URL: <https://niss.gov.ua/sites/default/files/2022-01/zovnishnya-torgivlya-tovaramy-ukrainy-za-2021-rik.pdf> (дата звернення 16.07.2023)
15. Коскіна Ю.О., Дрожжин О.Л. Аналіз обсягів і динаміки «морського» експорту зерна Україною. *Збірник наукових праць ДУІТ. Серія «Транспортні системи і технології»*. 2020. Вип. 35. С. 205-215. DOI:10.32703/2617-9040-2020-35-20
16. Кіщак І.Т., Порудєєва І.В. Морські порти України в контексті підвищення їхньої конкурентоспроможності. *Приазовський економічний вісник*. 2018. Вип. 6 (11). С. 42-46.
17. Ліпський В.В. Сучасний стан, проблеми та перспективи розвитку морських портів України. *Науковий вісник Ужгородського національного університету*. 2018. Вип. 19. Ч. 1. С. 165-169.
18. Стасюк О.М., Чмирьова Л.Ю., Федяй Н.О. Ринки вантажних і пасажирських перевезень: проблеми та тенденції. *Ефективна економіка*. 2020. № 9. URL: http://www.economy.nayka.com.ua/pdf/9_2020/56.pdf (дата звернення 20.08.2023) DOI: 10.32702/2307-2105-2020.9.54
19. Порты Украины в ближайшее время примут пять судов с импортным углем из США. URL: https://cfts.org.ua/news/2021/11/02/porty_ukrainy_v_blizhayshee_vremya_primut_pyat_sudov_s_importnym_uglem_iz_ssha_67475 (дата звернення 16.07.2023)
20. Експорт добрив Україною виріс на 320%. URL: <https://agronews.ua/news/tempy-eksportu-dobryv-z-ukrainy-vuperedzhaiut-import/> (дата звернення 16.07.2023)
21. Бондар Г. Розблокування експорту металу та руди через морські порти дасть Україні \$600 млн щомісяця – Форбс. URL: <https://www.unian.ua/economics/other/rozblokuvannya-eksportu-metalu-ta-rudi-cherez-morski-porti-dast-ukrajini-600-mln-shchomisyacya-forbs-ostanni-novini-11937231.html> (дата звернення 16.07.2023)
22. Вугільна промисловість України в умовах гібридної війни. Аналітична записка. URL: <https://niss.gov.ua/doslidzhennya/nacionalna-bezpeka/vugilna-promislovist-ukraini-v-umovakh-gibridnoi-viyni-analitichna> (дата звернення 16.07.2023)
23. Показники роботи. URL: <http://www.uspa.gov.ua/ru/pokazateli-raboty>. (дата звернення 16.07.2023)
24. Статистика-2021. Підсумки роботи морських портів України за січень-грудень. *Порти України*. 2022. № 1. С. 50-53.

Shybaiev O.H., Koskina Yu.O., Kravchenko O.A., Akimov K.S. COAL TURNOVERS IN UKRAINIAN PORTS: RETROSPECTIVE REVIEW AND CURRENT STATE

The paper provides an overview of the situation in the coal handling market in Ukrainian ports in the last pre-war years in comparison with the period up to 2014. The location of a significant number of powerful coal industry enterprises on the territories not under the control of the Ukrainian authorities, as well as the political situation caused by the further aggression of Russia, led to changes in volumes, dynamics and geography of foreign trade operations with coal. Accordingly, the volumes, dynamics and directions of coal transshipment through domestic ports have undergone significant changes. It was established that, starting from 2014, the volumes of coal imports through sea ports significantly outweigh the volumes of coal handling in exports – against the background of a fivefold decrease in the total volumes of coal handling. Changes related to changes in the geography of imports also played a significant role in the increase of "sea" coal imports – large volumes of coal arrived in Ukraine by sea vessels from South Africa, the USA, and Australia, in contrast to supplies from the Russian Federation, which were carried out by rail. The share of coal in the total cargo turnover of the ports has also fallen from approximately 12% in the period before 2014 to slightly more than 2% in recent years, which is actually a logical consequence of the decrease in the volume of cargo flows. It was determined that the main "coal" ports of our country are Mariupol, Pivdenny, Izmail, Chornomorsk, and Mykolaiv with a certain "specialization" in directions of the handling (export or transit - in pre-war times). The named ports provide more than 90% of the cargo turnover of Ukrainian ports for coal. In recent years, taking into account the changes in the direction of coal handling, domestic ports worked mostly with imported coal. The review presented in the paper is limited to statistical data for 2021 inclusive, because there are no official statistical data for the period January-February 2022, and as of February 2022, domestic ports are known to operate in a limited mode.

Key words: coal, turnovers, sea transport, Ukrainian ports, carriages, vessels.

Шкурко Є.Л.

Державний університет інфраструктури та технологій

Безклубна Н.Л.ВСП «Київський фаховий коледж морського і річкового флоту та транспортних технологій
Державного університету інфраструктури та технологій»

ЕКОЛОГІЧНА СТІЙКІСТЬ ПОРТОВОЇ ІНФРАСТРУКТУРИ: ВПРОВАДЖЕННЯ ЗЕЛЕНИХ ТЕХНОЛОГІЙ ТА ЕНЕРГОЕФЕКТИВНИХ РІШЕНЬ

У статті авторами було розглянуто та проаналізовано проблему екологічної стійкості портової інфраструктури, акцентуючи увагу на впровадженні технічних зелених рішень та інноваційних енергоєфективних технологій. Дослідження спрямоване на розкриття комплексності екологічних викликів, що виникають у результаті функціонування портів та мають значний вплив на довкілля. Аналіз починається з визначення ключових аспектів портової інфраструктури, які спричиняють негативний екологічний відбиток. Під ретельним дослідженням – викиди та вплив судноплавства на якість повітря та води, споживання енергії та водних ресурсів, а також проблеми утилізації відходів. Посилена увагу у дослідженні виділено можливість впровадження технічних інновацій для забезпечення екологічної стійкості портового комплексу. Використання альтернативних джерел енергії, таких як сонячні панелі та вітрові установки, розглядається в якості потенційного способу зменшення викидів та зниження енергозалежності. Авторами розглядаються аспекти вдосконалення транспортних та логістичних процесів, що дозволяють оптимізувати маршрути, зменшити енергетичні витрати та вплив на навколишнє середовище. Технології автоматизації та управління допомагають підвищити ефективність операцій та ресурсозбереження. Важливий аспект становить дослідження можливостей використання інноваційних систем утилізації відходів. Впровадження передових методів переробки та вторинного використання відходів може вирішити проблеми екологічного забруднення та сприяти створенню замкнутого екологічного циклу. Основний акцент робиться на розгляді успішних практичних прикладів зеленої модернізації портової інфраструктури, висвітлюючи їхні технічні аспекти та позитивні результати. Автори статті надають інженерні обґрунтування та аналіз впливу цих рішень на технічну, економічну та екологічну сфери. Результати дослідження підкреслюють, що впровадження технічних інновацій та зелених технологій у портовому секторі не лише є реалістичною перспективою, але й вимагає системного підходу, технічного знання та співпраці всіх зацікавлених сторін. Надання авторами науково обґрунтованих рекомендацій та технічних рішень має сприяти підвищенню стійкості портової інфраструктури, раціональному використанню ресурсів та сприяти досягненню балансу між господарськими потребами та екологічною відповідальністю.

Ключові слова: екологічна стійкість, портова інфраструктура, зелені технології, енергоєфективні рішення, екологічний вплив, інновації, оптимізація ресурсів.

Постановка проблеми. В умовах невідомої трансформації глобального екологічного ландшафту та зростаючих антропогенних втручань у природні баланси, особлива увага спрямовується на проблематику екологічної стійкості у контексті портової інфраструктури. За сприятливих умов, порти виконують ключову роль у міжнародній торгівлі та забезпеченні господарських потреб суспільства, але водночас вони конфронтуються з трансграничними екологічними викликами. Прискорена індустріалізація, збільшення обсягів судноплавства та зростаюча залежність від енерго-

ресурсів формують середовище, в якому портова інфраструктура стає у центрі важливих екологічних перетворень. Широка гама антропогенних факторів, таких як емісії забруднюючих речовин, відходи, шум та зміни гідрологічних режимів, формує суттєвий вплив на екосистеми прибережних територій та водних ресурсів. У цьому контексті актуалізується необхідність системного аналізу та комплексного вирішення екологічних проблем, що виникають на стику портової інфраструктури, транспортних маршрутів та біорізноманітних комплексів. Таким чином, проблема

екологічної стійкості портової інфраструктури викликає нове звучання в умовах глобальних змін, вимагаючи розробки та впровадження науково-обґрунтованих стратегій підтримки екологічно збалансованого розвитку портового комплексу у контексті екологічної стійкості.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. В останній час дослідники (Бойченко М. [1], Власова В., Рябова К. [2], Петренко О., Шматок Ю. [4], Щербина В. [6] тощо) активно розглядають вплив портової діяльності на довкілля, розглядають можливості використання зелених технологій, а також вивчають вплив енергоефективних рішень на підвищення сталості діяльності портів.

Новітні дослідження (Жарська І., Марчук І., Орловська С. [3], Трушкіна Н. [5], М. Дзедлінські [10], К. Завада [11], Ю. Лі, С. Луї [12], Бойчук Н., С. Кауф [13], Р. Рен, В. Хью, Дж. Донг [14] тощо) підтверджують позитивні ефекти впровадження зелених технологій, таких як використання альтернативних джерел енергії та удосконалення логістичних процесів. Ці рішення сприяють зниженню викидів та споживанню ресурсів, а також забезпечують підвищення конкурентоспроможності портів на світовому ринку.

Проте, водночас існують невирішені питання, зокрема пов'язані з ефективністю впровадження зелених технологій у великих інфраструктурних комплексах. Науковці також наголошують на потребі уточнення механізмів моніторингу та оцінки екологічних параметрів, щоб забезпечити об'єктивні дані про ефективність заходів.

Отже, хоча науковий прогрес у розумінні та впровадженні зелених технологій у портовій інфраструктурі є помітним, є важливим завданням подальше дослідження невирішених аспектів, що дозволить розвивати більш ефективні стратегії збалансованого та стійкого розвитку цього сектору.

Метою статті є глибокий аналіз та комплексний розгляд проблеми забезпечення екологічної стійкості у контексті портової інфраструктури, що стоїть перед сучасним суспільством. Основний фокус дослідження спрямований на вивчення можливостей впровадження технічних інновацій та зелених технологій для зменшення негативного впливу цього сектору на природне середовище та вирішення екологічних викликів.

Окрім того, метою є виявлення можливостей застосування новітніх технологій, таких як відновлювані джерела енергії та оптимізація логістичних процесів, для забезпечення більш ефективного та стійкого функціонування портів.

Виклад основного матеріалу. У сучасних умовах, коли проблеми екологічного зростання, змін клімату та природних ресурсів стають дедалі більш актуальними, питання екологічної стійкості набувають особливої важливості у різних сферах господарської діяльності. Порти, що відіграють стратегічну роль у міжнародній торгівлі та логістичних мережах, не є винятком. Вимоги до забезпечення ефективності їх діяльності постійно зростають, одночасно накладаючи значний екологічний відбиток на природне середовище.

Однією з ключових проблем, яка стоїть перед портовою інфраструктурою, є забезпечення екологічної стійкості її функціонування. Велика кількість суден, емісії забруднюючих речовин, енергозалежність та збільшення обсягів перевезень створюють серйозний виклик для збереження екосистем та забезпечення життєздатності морського середовища [4].

Аналізуючи сучасну портову інфраструктуру, можна визначити кілька ключових аспектів, які викликають серйозні екологічні обтяження (таблиця 1).

Звертаючи увагу на аспекти викидів та впливу судноплавства на якість повітря та води, споживання енергії та водних ресурсів, а також проблеми утилізації відходів, відзначається ряд взаємопов'язаних зв'язків і проблем, що впливають на екологічний стан портової інфраструктури. Викиди, створені судноплавством, виступають важливим джерелом антропогенного забруднення повітря та води. Велика концентрація суден та об'єктів портового комплексу призводить до інтенсивних викидів забруднюючих речовин у повітря, що у свою чергу впливає на якість атмосферного повітря в околицях порту та на значну відстань від нього [6].

Суттєвий вплив судноплавства на довкілля зумовлений також великим споживанням енергії, особливо традиційного палива з високим вмістом сірки. Використання цього виду палива призводить до викидів шкідливих речовин, що негативно впливають на атмосферу та підсилюють ефект парникового газу. Крім того, інтенсивне споживання палива сприяє енергозалежності порту та має великий вплив на водні ресурси, оскільки забезпечення охолодження та інших потреб потребує значних обсягів води [11].

Проблема вилучення відходів у портовому комплексі стає значною, оскільки відновлювані та невідновлювані відходи, які накопичуються, потребують спеціалізованої обробки та утилізації. За відсутності адекватних підходів, можливість забруднення ґрунту та води небезпечними компонентами стає реальністю [14].

Ключові аспекти сучасної портової інфраструктури, які викликають екологічні проблеми

Ключовий аспект	Вплив на довкілля	Проблема	Наслідки	Рекомендації
Концентрація транспорту	Викиди забруднюючих речовин у повітря, загроза здоров'ю	Загострення атмосферного забруднення	Погіршення якості повітря, здоров'я мешканців	Впровадження екологічних норм та стандартів, застосування електромобілів
Використання низькоякісного палива	Викиди шкідливих речовин та парникових газів	Посилення ефекту парникового газу, зміна клімату	Зміни кліматичних умов, негативний вплив на біосистеми	Перехід до використання відновлюваних джерел енергії, вдосконалення технологій очищення викидів
Використання водних ресурсів	Дисбаланс водного балансу, зміни хімічного складу води	Вплив на водні екосистеми, забруднення водойм	Зміни у біологічній різноманітності, загроза для водних організмів	Впровадження збережливого використання водних ресурсів, використання технологій очищення стічних вод
Акумуляція відходів	Забруднення ґрунту та води, небезпека для здоров'я	Несправна утилізація відходів, недостатня обробка	Забруднення природних середовищ, ризик для здоров'я людей	Розвиток програми з відновлення відходів, утилізація та переробка
Несвідоме управління	Посилення екологічного впливу, загроза сталому розвитку	Відсутність ефективних стратегій та рішень	Зростання негативного екологічного відбитку, загострення проблем	Розробка та впровадження інноваційних технічних та організаційних рішень

Джерело: розроблено авторами на основі [3]

Враховуючи вищезазначене, важливо розробляти і впроваджувати інноваційні технічні та організаційні рішення (таблиця 2), що спрямовані на зниження негативного впливу судноплавства на довкілля, раціональне споживання енергії та водних ресурсів, а також ефективне управління відходами у портовому комплексі.

Здійснення технічних інновацій є перспективним шляхом до досягнення екологічної стійкості портового комплексу. Впровадження передових технологій дозволяє ефективно знизити негативний вплив на довкілля та забезпечити баланс між господарськими потребами та екологічною відповідальністю. Технічні інновації можуть включати у себе розробку та впровадження чистих паливних систем, використання відновлюваних джерел енергії для живлення портових процесів, розробку ефективних систем управління ресурсами та відходами, а також вдосконалення технологій обробки та переробки відходів [8].

Впровадження інновацій дозволяє досягти не лише екологічної, але й економічної вигоди. Сучасні технології можуть зменшити споживання палива, знизити вартість експлуатації обладнання

та оптимізувати процеси логістики та транспортування. Це сприяє збільшенню конкурентоспроможності порту на міжнародному ринку, а також підвищенню інвестиційної привабливості [7].

Більшість портових операторів та організацій розуміють, що інновації є важливою складовою сталого розвитку. Розробка та впровадження технічних інновацій у портовому комплексі вимагає співпраці між галузевими гравцями, науковими установами та владними органами. Тільки завдяки спільним зусиллям можна досягти ефективного вирішення екологічних, економічних та соціальних викликів, з якими стикається портова індустрія [1].

Отже, можливість впровадження технічних інновацій є ключовим елементом у досягненні екологічної стійкості портового комплексу, сприяючи збалансованому розвитку економіки та довкілля.

З урахуванням технічних можливостей порту слід відзначити, що впровадження технічних інновацій має великий потенціал для досягнення екологічної стійкості. Специфічні характеристики портової інфраструктури, такі як наявність різних

Інноваційні технічні та організаційні рішення щодо зниження негативного впливу судноплавства на довкілля, раціонального споживання енергії та водних ресурсів тощо

Рішення	Спрямованість	Очікувані результати	Технічні заходи і впровадження
Використання екологічно чистого палива	Зниження викидів шкідливих речовин та парникових газів	Зменшення негативного впливу на атмосферу, здоров'я мешканців, поліпшення клімату	Встановлення систем подачі та зберігання палива, побудова інфраструктури
Використання альтернативних джерел енергії (сонячні панелі, вітрові установки тощо)	Зменшення споживання традиційних джерел енергії та водних ресурсів	Зниження енергозалежності порту, заощадження водних ресурсів, підвищення сталості та незалежності від традиційних джерел	Встановлення сонячних панелей та вітрових установок, модернізація енергосистем
Оптимізація маршрутів суден	Мінімізація пройдених відстаней та споживання палива	Ефективне використання палива, зменшення викидів, зниження вартості перевезень	Впровадження систем моніторингу та аналізу, вдосконалення навігаційних алгоритмів
Вдосконалення технологій утилізації відходів	Зменшення кількості та негативного впливу невідновлюваних відходів	Зниження забруднення ґрунту та води, зменшення ризику негативного впливу на здоров'я мешканців та довкілля	Розробка та впровадження ефективних систем утилізації та переробки відходів

Джерело: розроблено авторами на основі [7]

видів обладнання, технічних систем та інфраструктурних об'єктів, створюють можливості для інтеграції нових технологій.

Технічні інновації можуть включати у себе впровадження автоматизованих систем управління ресурсами, що дозволить оптимізувати споживання енергії та водних ресурсів у режимі реального часу. Розробка та використання власних джерел відновлюваної енергії, зокрема сонячних панелей або вітрових установок, може забезпечити ефективний захист від коливань цін на енергоносії [2].

Зокрема, вдосконалення технічних систем утилізації та переробки відходів може забезпечити мінімізацію негативного впливу на навколишнє середовище. Розробка спеціалізованих технологій для обробки невідновлюваних відходів може зменшити ризики забруднення ґрунту та води.

Однак важливо враховувати, що впровадження технічних інновацій потребує не лише технічних знань, але і адаптації до нових систем управління, навчання персоналу та координації дій. Взаємодія зі спеціалізованими технічними компаніями, консультантами та дослідницькими установами може значно підвищити ефективність впровадження інноваційних рішень [1].

Отже, враховуючи технічні можливості порту, впровадження технічних інновацій може стати ключовим фактором у забезпеченні екологічної

стійкості та раціонального використання ресурсів у портовому комплексі.

Розглядаючи аспекти вдосконалення транспортних та логістичних процесів, які дозволяють оптимізувати маршрути, зменшити енергетичні витрати та вплив на навколишнє середовище, можна відзначити низку ключових стратегій (таблиця 3), спрямованих на досягнення екологічної стійкості порту.

Отже, аспекти вдосконалення транспортних та логістичних процесів у портовому комплексі включають у себе застосування інноваційних технологій, використання інтелектуальних систем управління, віддаленого моніторингу та мульти-модальних перевезень. Ці підходи сприяють оптимізації ресурсів, зменшенню негативного впливу на навколишнє середовище та покращенню ефективності портової діяльності.

Досліджуючи можливості використання інноваційних систем утилізації відходів у портовому комплексі, важливо звернути увагу на їх вплив на екологічну стійкість та створення замкнутого екологічного циклу [10]. Впровадження передових методів переробки та вторинного використання відходів може виявитися ключовим рішенням для вирішення проблем екологічного забруднення та досягнення сталої рівноваги між господарськими потребами та охороною довкілля.

Розглядаючи перші можливості, інноваційні системи утилізації відходів дозволяють ефек-

Ключові стратегії екологічної стійкості портової інфраструктури

Ключова стратегія	Спрямованість	Очікувані результати	Засоби і впровадження
Використання інтелектуальних систем управління логістикою та транспортом	Оптимізація маршрутів, зменшення заторів, підвищення ефективності руху	Зменшення енергетичних витрат, зниження викидів, скорочення часу на перевезення	Впровадження аналітичних та управлінських систем, розробка алгоритмів
Використання технологій віддаленого моніторингу та керування транспортними засобами	Оптимізація руху суден, адаптація до погодних умов, ефективне використання ресурсів	Зменшення споживання палива, зниження викидів, покращення ефективності руху	Встановлення систем моніторингу, розробка віддалених систем управління
Впровадження мультимодальних перевезень	Оптимальне поєднання різних видів транспорту, зменшення часу доставки та вартості перевезень	Зменшення часу та вартості перевезень, зниження споживання енергії, зменшення викидів	Розробка інтегрованих логістичних систем, управління та моніторинг руху
Використання відновлюваних джерел енергії (сонячні панелі, вітрові установки)	Забезпечення джерел енергії з низьким впливом на довкілля, зменшення енергетичних витрат	Зменшення використання нестійких джерел енергії, зменшення викидів парникових газів, підвищення сталості енергозабезпечення	Встановлення сонячних панелей, розробка технологій збереження та перерозподілу енергії

Джерело: розроблено авторами на основі [9, 13]

тивно вирішувати проблему їх накопичення та негативного впливу на довкілля. Сучасні методи переробки дозволяють знижувати обсяги відходів, піддавати їх рециклінгу та використовувати у виробничих процесах, що у свою чергу сприяє зменшенню потреби у природних ресурсах та покращенню якості навколишнього середовища.

Важливим аспектом є створення замкнутого екологічного циклу, де відходи стають сировиною для нових продуктів. Це дозволяє уникнути забруднення природних ресурсів, зменшити потребу у видобутку та зберегти енергію, яка б витрачалася на виробництво з нуля. Спільно з інноваційними методами утилізації, такими як біохімічний розклад та технології піролізу, можна досягти максимальної ефективності використання ресурсів та знизити викиди забруднюючих речовин [12].

Однак для успішного впровадження інноваційних систем утилізації відходів, необхідне забезпечення не лише технічної підтримки, а й адаптації до регулюючого середовища та забезпечення підтримки від владних органів та галузевих гравців. Крім того, важливо навчати персонал сучасним методам утилізації та створювати свідомість щодо екологічної важливості відповідального відношення до відходів.

Усе це підсилює переконання, що впровадження інноваційних систем утилізації відходів може бути кроком до досягнення екологічної стійкості портового комплексу, сприяючи утворенню

замкнутого екологічного циклу та забезпечуючи збереження довкілля для майбутніх поколінь.

Проаналізуємо приклади успішної зеленої модернізації портової інфраструктури, розглядаючи їхні технічні аспекти та позитивні результати (таблиця 4). Ці приклади демонструють, як впровадження зелених технологій може вплинути на підвищення екологічної стійкості портових комплексів.

Ці приклади підкреслюють важливість і позитивний вплив впровадження зелених технологій у портові комплекси. Вони демонструють, як зелена модернізація може призвести до значних змін у технічних процесах та позитивно позначитися на довкіллі, знизити викиди та сприяти створенню більш стійкого та екологічного портового середовища.

Інженерні обґрунтування та аналіз впливу зелених технологій на технічну, економічну та екологічну сфери може бути наступним [16]:

1. Технічна сфера. Заміна традиційних дизельних двигунів на електричні або гібридні системи для судноплавства може покращити ефективність використання палива та знизити викиди шкідливих речовин, таких як оксиди азоту та сірки. Встановлення сонячних панелей та вітрових установок на територіях портового комплексу забезпечить виробництво екологічно чистої електроенергії для потреб порту. Автоматизовані системи керування та віддаленого моніторингу допоможуть оптимізувати робочі процеси та ресурси, забезпечуючи ефективно використання інфраструктури.

Впровадження зелених технологій у портові комплекси світу

Приклад впровадження	Технологія або стратегія	Технічні аспекти	Позитивні результати	Застосування
Використання сонячних енергосистем у порту Гамбург	Встановлення сонячних панелей для генерації електроенергії	Проектування, монтаж, зберігання та розподіл енергії	Зменшення викидів CO ₂ , економія енергоспоживання	Території портового комплексу, дахи складських приміщень
Заміна традиційних дизельних двигунів на електричні або гібридні системи для судноплавства	Використання електричних та гібридних систем для суден	Розробка та встановлення електричних систем, системи зарядки	Зниження викидів, покращення якості повітря та води, зменшення споживання енергії	Порт Стокгольм, Порт Роттердам, Порт Гамбург
Інтеграція автоматизованих систем керування у портовому комплексі	Впровадження систем автоматизації та віддаленого керування	Розробка програмного забезпечення інтеграції різних систем	Підвищення ефективності, зменшення енергетичних витрат, оптимізація використання ресурсів	Порт Шанхай, Порт Лос-Анджелес, Порт Роттердам
Використання електричних транспортних засобів для внутрішньо-портового руху	Встановлення зарядної інфраструктури для електромобілів	Розробка інфраструктури для зарядки, інтеграція з внутрішніми системами транспорту	Зниження залежності від палива, зменшення викидів, поліпшення екологічної обстановки	Порт Осло, Порт Копенгаген, Порт Гамбург
Впровадження системи сортування та переробки відходів у порту	Встановлення автоматизованих зон сортування для відходів	Розробка системи, інтеграція з обробкою відходів	Зниження обсягів відходів, покращення ефективності утилізації, зменшення забруднення	Порт Роттердам, Порт Гамбург, Порт Лос-Анджелес

Джерело: розроблено авторами [5, 15]

2. Економічна сфера. Впровадження зелених технологій може призвести до значних економічних вигод. Зокрема, зменшення споживання палива та енергії у результаті використання ефективних систем енергозбереження та відновлювальних джерел енергії призведе до зниження витрат на енергоносії. Автоматизація та оптимізація робочих процесів допоможе знизити витрати на операції та обслуговування порту.

3. Екологічна сфера. Впровадження зелених технологій сприятиме значному зниженню викидів CO₂ та інших забруднюючих речовин, зменшить вплив на якість повітря та води. Також, використання відновлювальних джерел енергії дозволить знизити енергетичну залежність порту від традиційних джерел палива. Покращення утилізації відходів та впровадження передових методів переробки зменшать екологічне навантаження на природні ресурси.

Всі ці інженерні рішення сприятимуть досягненню екологічної стійкості портового комплексу, забезпечать більш раціональне використання

ресурсів та позитивно відзначаться на економічному та екологічному стані порту.

Припустимо, що порт має велику площу дахів на складських приміщеннях, де можна встановити сонячні панелі. Розглянемо, як це може вплинути на економію електроенергії та зниження викидів CO₂ (таблиця 5).

Приклад результатів розрахунків щодо встановлення сонячних панелей на дахах складських приміщень портового комплексу наведено у таблиці 6.

Вплив утилізації відходів на різні аспекти функціонування портового комплексу є актуальним предметом дослідження у сучасному світі. У зв'язку зі зростаючою увагою до екологічних проблем, ефективне управління відходами стає невід'ємною частиною стратегічного планування і розвитку портових інфраструктур. У даному контексті, таблиця 7 надає аналіз впливу процесів утилізації відходів на ключові аспекти портового комплексу, зокрема технічну, економічну та екологічну сфери.

Таблиця 5

Вплив використання сонячних енергосистем на технічну, економічну та екологічну сфери портового комплексу

Впливовий аспект	Технічна сфера	Економічна сфера	Екологічна сфера
Генерація електроенергії	Встановлення сонячних панелей та інфраструктури для їхньої роботи	Зменшення витрат на електроенергію порту	Зниження викидів CO ₂ іншими забруднюючими речовинами через використання альтернативного джерела енергії
Зменшення витрат палива та енергії	Зменшення залежності від традиційних джерел палива для роботи двигунів суден та інших технічних систем	Зниження витрат на пальне для генерації електроенергії та операцій порту	Зниження використання вуглецю та інших шкідливих речовин за рахунок використання сонячної енергії
Зниження обсягів викидів CO ₂ та інших забруднюючих речовин	Мінімізація викидів токсичних газів та частки CO ₂ завдяки меншому використанню палива та енергії	Зменшення можливих платежів за викиди CO ₂ відповідно до регулюючих стандартів	Зменшення негативного впливу на якість повітря та води через зниження викидів та споживання енергії у процесах портових операцій

Джерело: розроблено авторами

Таблиця 6

Результати розрахунків використання сонячних енергосистем на технічну, економічну та екологічну сфери портового комплексу

Впливовий аспект	Технічна сфера	Економічна сфера	Екологічна сфера
Потужність сонячних панелей	200 кВт		
Річна генерація електроенергії	292 000 кВт-год		
Вартість електроенергії з мережі		\$0,12 за кВт-год	
Заощадження на електроенергії		\$34 920	
Викид CO ₂ за кожен кВт-год			0,5 кг CO ₂ за кВт-год
Загальний зниження викидів CO ₂			146 000 кг CO ₂ (146 тонн)

Джерело: розроблено авторами

Таблиця 7

Вплив утилізації відходів на технічну, економічну та екологічну сфери портового комплексу

Впливовий аспект	Технічна сфера	Економічна сфера	Екологічна сфера
Обсяг відходів	Зменшення обсягу відходів, що потребують утилізації		
Технічні рішення утилізації	Встановлення сучасних систем сортування та переробки		
Вартість утилізації відходів		Зниження витрат на вивезення та знищення відходів	
Зменшення негативного впливу на довкілля	Зменшення негативного впливу великого обсягу відходів на навколишнє середовище завдяки їхньому оптимальному утилізованому знищенню		Зниження негативного впливу забруднюючих речовин на природні ресурси та забруднення повітря та води

Джерело: розроблено авторами

Технічні рішення, обґрунтовані дослідженнями, включають у себе впровадження зелених технологій, оптимізацію процесів споживання ресурсів, та розробку ефективних систем утилізації відходів. Рекомендації з організаційного управління та технологічних інновацій допомагають встановити баланс між господарськими потребами порту та його екологічною відповідальністю.

Цей підхід до розробки рекомендацій та реалізації технічних рішень допомагає досягнути гармонії між розвитком портового сектору та збере-

женням довкілля. Науково-обґрунтовані підходи створюють основу для збалансованого росту, забезпечуючи ефективне використання ресурсів та покращення якості навколишнього середовища (таблиця 8).

Отже, результати дослідження підкреслюють, що впровадження технічних інновацій та зелених технологій у портовому секторі відкриває перед нами широкі можливості для забезпечення сталого розвитку. Однак цей процес вимагає системного підходу, детального технічного знання

Рекомендації для підвищення стійкості портової інфраструктури

№	Рекомендація	Очікувані результати
1	Впровадження сонячних енергосистем для забезпечення часткового живлення портового комплексу	Зниження витрат на електроенергію, зменшення викидів CO ₂ , забезпечення енергетичної незалежності
2	Застосування ефективних систем сортування та переробки відходів для зниження негативного впливу на навколишнє середовище	Зменшення кількості відходів, покращення якості повітря та води, зменшення забруднення
3	Використання альтернативних джерел енергії, таких як вітрові установки, для резервного живлення порту	Зменшення ризику зупинки діяльності порту при відключенні електроенергії з мережі
4	Розробка та впровадження ефективних систем моніторингу викидів та якості повітря та води	Вчасне виявлення забруднень та можливість швидкого реагування на них
5	Вдосконалення транспортних та логістичних процесів для оптимізації маршрутів та зниження енергетичних витрат	Зменшення часу та витрат на транспортні операції, зменшення споживання палива
6	Впровадження інтелектуальних систем управління для підвищення ефективності операцій та ресурсозбереження	Оптимізація ресурсів, зниження витрат, покращення ефективності операцій
7	Розвиток програм екологічної освіти та підвищення свідомості персоналу стосовно важливості екологічної відповідальності	Підвищення свідомості персоналу, врахування екологічних аспектів у роботі
8	Встановлення ефективних систем моніторингу використання водних ресурсів та реалізація заходів з їх раціонального використання	Зменшення витрат водних ресурсів, забезпечення стійкого водозабезпечення

Джерело: розроблено авторами

та активної співпраці всіх зацікавлених сторін, включаючи власників портів, урядові органи, наукову спільноту та бізнес-середовище.

Зелені технології та інновації можуть стати драйверами позитивних змін, забезпечуючи відчутний зріст ефективності, зменшення негативного впливу на довкілля та поліпшення якості життя. Проте важливо враховувати складність цього процесу, який потребує інтегрованого підходу до впровадження інновацій, їхнього адаптування під конкретні умови та постійного моніторингу результатів.

Таким чином, ефективне впровадження зелених технологій та технічних інновацій у портовому секторі вимагає взаємодії та співпраці між різними суб'єктами, а також розуміння, що це не тільки перспективна можливість, а й необхідний крок у напрямку сталого розвитку, збереження довкілля та забезпечення майбутніх поколінь належною спадщиною.

Висновки. У світлі зростаючого усвідомлення екологічних викликів, проблема екологічної стійкості портової інфраструктури набуває важливості як на рівні локальних громад, так і на глобальному масштабі. Дослідження, присвячені впровадженню зелених технологій та енергоефективних рішень у портовому секторі, вказують на необхідність переходу до сталого розвитку, забезпечення збалансованого поєднання економічних і соціальних інтересів з екологічною відповідальністю.

Аналіз проблем, пов'язаних з негативним впливом портової інфраструктури, показав, що впровадження зелених технологій може значно знизити екологічний відбиток. Використання альтернативних джерел енергії, оптимізація логістичних процесів, вдосконалення систем утилізації відходів – це лише декілька напрямків, які спрямовані на поліпшення якості довкілля та збереження ресурсів.

Проте, варто відзначити, що впровадження зелених технологій вимагає не тільки фінансових і технічних зусиль, але й сприйняття змін з боку усіх зацікавлених сторін. Системний підхід, наукові обґрунтування та координація дій є ключовими аспектами успішної реалізації зелених ініціатив у портовій інфраструктурі.

Для подальших досліджень варто розглянути більш глибокий аналіз конкретних технічних рішень та їхнього впливу на різні сфери, включаючи більш докладний економічний аналіз, оцінку соціального впливу та можливостей впровадження у різних географічних умовах. Також важливим є дослідження взаємозв'язку між різними технічними рішеннями та їхнім впливом на досягнення цілей сталого розвитку.

У підсумку, впровадження зелених технологій та енергоефективних рішень у портовому секторі не тільки сприятиме зменшенню негативного впливу на навколишнє середовище, але й покладе основи для сталого розвитку портової інфраструктури, забезпечуючи баланс між економічними і екологічними інтересами.

Список літератури:

1. Бойченко М. В. Зелена логістика вантажоперевезень: проблеми, шляхи вирішення. Вісник економічної науки України. 2021. № 2 (41). С. 152-155. DOI: [https://doi.org/10.37405/1729-7206.2021.2\(41\).152-155](https://doi.org/10.37405/1729-7206.2021.2(41).152-155)
2. Власова В.П., Рябова К.Ю. Вплив глобальної «зеленої» трансформації економіки на морські порти Транспорт та логістика: сучасні виклики та перспективи розвитку (Transport & Logistics: T 65 Current Challenges and Prospects): матеріали Всеукраїнської науково-практичної конференції, м. Одеса, 18 листопада 2021 р. / [під наук ред. Ільченко С. В.]; НАНУ, МОНУ та ін. – Одеса: ДУ ІРЕЕД НАН України, 2021. – 166 с. С. 98-101.
3. Жарська І.О., Марчук І.С., Орловська С.С. Екологічні аспекти логістичної діяльності на засадах сталого розвитку. Науковий вісник Одеського національного економічного університету: зб. наук. праць; за ред.: В.В. Коваленко (голов. ред.). (ISSN 2409-9260). Одеса: Одеський національний економічний університет. 2022. № 9-10 (298-299). С. 110-117.
4. Петренко, О. І., Шматок, Ю. В. Стан вітчизняного морського середовища: проблеми та можливі шляхи їх подолання. Вісник Національного університету водного господарства та природокористування (2(78)). 2017, pp. 63-72.
5. Трушкіна Н. В. Трансформація транспортно-логістичної системи в Україні на засадах зеленої логістики. Економічний вісник Донбасу. 2019. № 2(56). С. 151-161. DOI: [https://doi.org/10.12958/1817-3772-2019-2\(56\)-151-161](https://doi.org/10.12958/1817-3772-2019-2(56)-151-161).
6. Щербина В.В. Проблеми та завдання розвитку портової логістики України // Розвиток методів управління та господарювання на транспорті: Зб. наук. праць, 2019. № 2 (67). С. 89-101. DOI: [10.31375/2226-1915-2019-2-89-101](https://doi.org/10.31375/2226-1915-2019-2-89-101).
7. Green logistics, kassbohrer and poland's erontrans to become partners. URL: <https://www.sustainabletruckvan.com/kassbohrer-erontrans-partners-green-logistics/>
8. Green Logistics: Improving the Environmental Sustainability of Logistics / Ed by A. Mckinnon, S. Cullinane, M. Browne, A. Whiteing. London: Kogan Page, 2010. 385 p.
9. Duan X. Green logistic network design: intermodal transportation planning and vehicle routing problems. University of Louisville, 2016. 167 p.
10. Jedliński M. Między ekologią a ekonomią szkic problematyki zielonej logistyki. Uczelniane PWSZ im. angelusa silesiusa w wałbrzychu. 2010.
11. Krzysztof Zowada. Green Logistics: The Way to Environmental Sustainability of Logistics. Empirical Evidence from Polish SMEs. 2020, Vol. 9, no. 4. P. 231.
12. Li Y. B., Liu S. X. The forms of ecological logistics and its relationship under the globalization. 2008. Vol. 4, no. 3. P. 290–298.
13. Nataliia Boichuk, Sabina Kauf. Sustainable logistics: a framework for green city logistics – examples of polish cities. In conference proceeding of the 9th carpathian logistics congress. 2019. P. 339–346.
14. Ren R., Hu W., Dong J. A systematic literature review of green and sustainable logistics: bibliometric analysis, research trend and knowledge taxonomy. 2020. Vol. 17, no. 1. P. 261.
15. Richnák P. Gubová K. Green and reverse logistics in conditions of sustainable development in enterprises in Slovakia. Sustainability. 2021. No. 13. P. 581.
16. Vienožindienė M. Tamulienė V. Zaleckienė J. Green logistics practices seeking development of sustainability: evidence from lithuanian trans- portation and logistics companies. Energies. 2021. No. 14. P. 22.

Shkurko Ye.L., Bezklubna N.L. ECOLOGICAL SUSTAINABILITY OF PORT INFRASTRUCTURE: IMPLEMENTATION OF GREEN TECHNOLOGIES AND ENERGY-EFFICIENT SOLUTIONS

The article examines and analyzes the problem of ecological sustainability of port infrastructure, with a focus on the implementation of technical green solutions and innovative energy-efficient technologies. The research aims to uncover the complexity of ecological challenges arising from the functioning of ports, which significantly impact the environment. The analysis begins with defining key aspects of port infrastructure that contribute to a negative ecological footprint. Under careful investigation are emissions and the impact of shipping on air and water quality, energy and water resource consumption, as well as waste disposal issues. The article prominently explores the potential for implementing technical innovations to ensure the ecological sustainability of port complexes. The use of alternative energy sources, such as solar panels and wind turbines, is considered as a potential way to reduce emissions and energy dependence. The authors delve into improving transportation and logistics processes, allowing for route optimization, reduced energy consumption, and environmental impact. Automation and management technologies aid in enhancing operational efficiency and resource conservation. A crucial aspect involves exploring the possibilities of innovative waste disposal systems. Implementing advanced waste processing and recycling methods can address ecological pollution problems and contribute to a closed environmental cycle. The main focus lies in examining successful practical examples of green modernization of port infrastructure, highlighting their technical aspects and positive outcomes. The article authors provide engineering justifications and analyze the impact of these solutions on technical, economic, and environmental spheres. The research findings underscore that the incorporation of technical innovations and green technologies in the port sector is not only a realistic prospect but also requires a systematic approach, technical knowledge, and collaboration of all stakeholders. The authors' provision of scientifically grounded recommendations and technical solutions should enhance the resilience of port infrastructure, optimize resource utilization, and facilitate achieving a balance between economic needs and environmental responsibility.

Key words: ecological sustainability, port infrastructure, green technologies, energy-efficient solutions, environmental impact, innovation, resource optimization.

Відомості про авторів

Абдулін М.З. – доктор технічних наук, старший науковий співробітник, професор Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Адаменко І.О. – аспірант кафедри конструювання електронно-обчислювальної апаратури Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Акімов К.С. – аспірант кафедри експлуатації флоту і технології морських перевезень Одеського національного морського університету

Алексєєва І.Д. – магістр 2 року навчання освітньої програми «Технології електронних мультимедійних видань» за спеціальністю 186 – Видавництво та поліграфія Харківського національного економічного університету імені Семена Кузнеця

Андріянова М.В. – кандидат хімічних наук, доцент кафедри технологій природних і синтетичних полімерів, жирів та харчової продукції ДВНЗ «Український державний хіміко-технологічний університет»

Баранов І.О. – кандидат технічних наук, доцент кафедри «Автомобільний транспорт» ДВНЗ «Приазовський державний технічний університет»

Безклубна Н.Л. – голова ЦК «Транспортних технологій», викладач вищої категорії ВСП «Київський фаховий коледж морського і річкового флоту та транспортних технологій Державного університету інфраструктури та технологій»

Беляков Р.О. – кандидат технічних наук, доцент, докторант науково-організаційного відділу Військового інституту телекомунікацій та інформатизації імені Героїв Крут

Бик М.В. – кандидат хімічних наук, доцент кафедри технології електрохімічних виробництв Хіміко-технологічного факультету Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Близнюк О.В. – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри технології пластичних мас і біологічно активних полімерів Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут»

Богдан Г.А. – кандидат технічних наук, доцент кафедри автоматизації та систем неруйнівного контролю Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Бойко С.М. – кандидат технічних наук, доцент кафедри транспортних технологій Національного університету «Запорізька політехніка»

Борець І.В. – кандидат педагогічних наук, доцент, доцент кафедри організації авіаційних перевезень Національного авіаційного університету

Боянівський В.П. – аспірант 4 курсу кафедри теплової та альтернативної енергетики навчально-наукового інституту атомної та теплової енергетики Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Бурау Н.І. – доктор технічних наук, професор, завідувачка кафедри комп'ютерно-інтегрованих оптичних та навігаційних систем Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Бурлака Г.Ю. – аспірант 3 курсу навчання кафедри телекомунікацій Інституту телекомунікаційних систем Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Вадурін К.О. – аспірант, асистент кафедри комп'ютерної інженерії та електроніки Кременчуцького національного університету імені Михайла Остроградського

Вакалюк Т.А. – доктор педагогічних наук, професор, завідувач кафедри інженерії програмного забезпечення Державного університету «Житомирська політехніка»

Валько А.М. – старший викладач кафедри організації авіаційних перевезень Національного авіаційного університету

Васильєв Г.С. – доктор технічних наук, доцент кафедри технології електрохімічних виробництв Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Вдовичин Т.Я. – кандидат педагогічних наук, доцент кафедри фізики та інформаційних систем Дрогобицького державного педагогічного університету імені Івана Франка

Віннічук Е.В. – студент кафедри фізичної хімії Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Войцеховський В.С. – кандидат технічних наук, доцент кафедри організації авіаційних перевезень Національного авіаційного університету

Воробйова В.І. – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри фізичної хімії Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Габрієлова Т.Ю. – кандидат економічних наук, доцент, доцент кафедри організації авіаційних перевезень Національного авіаційного університету

Галаган Р.М. – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри автоматизації та систем неруйнівного контролю Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Гахраманов С.А. – кандидат технічних наук, доцент, Мінгечавірський державний університет (Азербайджан)

Гвоздік С.Д. – викладач циклової комісії аеронавігації Кременчуцького льотного коледжу Харківського національного університету внутрішніх справ

Гладкий Ю.М. – кандидат технічних наук, керівник підготовки Approved Training Organization «ГЛОБАЛ» Міжнародні Авіаційні Підготовки»

Глухова Н.В. – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри кіберфізичних та інформаційно-вимірювальних систем Національного технічного університету «Дніпровська політехніка»

Головенко В.О. – кандидат технічних наук, доцент кафедри технологій палив, полімерних та поліграфічних матеріалів ДВНЗ «Український державний хіміко-технологічний університет»

Григоренко О.Г. – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри інформаційно-комунікаційних технологій та систем Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Губар В.Г. – здобувач, старший викладач кафедри конструювання електронно-обчислювальної апаратури Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Гученко М.І. – доктор технічних наук, професор кафедри комп'ютерної інженерії та електроніки Кременчуцького національного університету імені Михайла Остроградського

Демішонкова С.А. – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри комп'ютерної інженерії та електромеханіки Київського національного університету технологій та дизайну

Дзюба А.В. – студент кафедри програмних засобів і технологій Херсонського національного технічного університету

Дмитренко І.А. – старший викладач кафедри інженерії програмного забезпечення Державного університету «Житомирська політехніка»

Довбиш І.О. – студентка 3 курсу групи ПК-11 кафедри автоматизації та систем неруйнівного контролю приладобудівного факультету Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Дробязко А.А. – аспірант кафедри технології електрохімічних виробництв Хіміко-технологічного факультету Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Дроздюк В.А. – старший науковий співробітник Українського науково-дослідного інституту спеціальної техніки та судових експертиз Служби безпеки України

Дубина В.О. – начальник відділу матеріального забезпечення Інституту спеціального зв'язку та захисту інформації Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Дульський А.І. – аспірант 1 курсу Навчально-наукового інституту атомної та теплової енергетики Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Жерновникова О.А. – доктор педагогічних наук, професор, завідувачка кафедри математики Харківського національного педагогічного університету імені Г.С. Сковороди

Завгородній В.В. – доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри інформаційних технологій Державного університету інфраструктури та технологій

Завгородній В.В. – доктор технічних наук, професор, доцент кафедри інформаційних систем і технологій Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Завгородня Г.А. – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри інформаційних технологій Державного університету інфраструктури та технологій

Зилевіч М.О. – аспірант кафедри конструювання електронно-обчислювальної апаратури Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Злотенко Б.М. – доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри комп'ютерної інженерії та електромеханіки Київського національного університету технологій та дизайну

Зубрицький В.В. – здобувач Державного університету «Житомирська політехніка»

Іщенко С.О. – доктор технічних наук, професор, професор кафедри транспортних технологій Національного університету «Запорізька політехніка»

Кириичук Д.Л. – кандидат технічних наук, доцент кафедри програмних засобів і технологій Херсонського національного технічного університету

Кириллова В.Ю. – кандидат технічних наук, доцент кафедри експлуатації флоту і технологій морських перевезень Навчально-наукового інституту морського бізнесу Одеського національного морського університету

Кириллова О.В. – доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри експлуатації портів і технологій вантажних робіт Навчально-наукового інституту морського бізнесу Одеського національного морського університету

Киричук Ю.В. – доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри автоматизації та систем неруйнівного контролю Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Кобильник Т.П. – кандидат педагогічних наук, доцент кафедри фізики та інформаційних систем Дрогобицького державного педагогічного університету імені Івана Франка

Кобилянська О.О. – аспірант кафедри теплової та альтернативної енергетики Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Колодежний В.А. – старший викладач кафедри динаміки і міцності машин та опору матеріалів Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Кононова І.В. – кандидат технічних наук, доцент, доцент спеціальної кафедри № 3 Інституту спеціального зв'язку та захисту інформації Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Копилов С.О. – аспірант кафедри технології пластичних мас і біологічно активних полімерів Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут»

Корнієнко Б.Я. – доктор технічних наук, професор кафедри інформаційних систем та технологій Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Коростельов А.С. – магістр, інженер-програміст кафедри комп'ютерної інженерії та електроніки Кременчуцького національного університету імені Михайла Остроградського

Коскіна Ю.О. – доктор технічних наук, професор кафедри експлуатації флоту і технології морських перевезень Одеського національного морського університету

Котов О.Б. – доктор технічних наук, доцент, професор кафедри транспортних технологій Національного університету «Запорізька політехніка»

Кравченко О.А. – кандидат технічних наук, доцент кафедри експлуатації флоту і технології морських перевезень Одеського національного морського університету

Кравченко С.М. – старший викладач кафедри інженерії програмного забезпечення Державного університету «Житомирська політехніка»

Кравченко Ф.Е. – студент кафедри фізичної хімії Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Кривобок Р.В. – кандидат технічних наук, доцент, заступник завідувача науково-дослідної частини Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут»

Крикун В.А. – аспірант 3 курсу кафедри комп'ютеризованих систем та програмних технологій Національного університету «Одеська політехніка»

Кунда Н.Т. – кандидат технічних наук, доцент, професор кафедри міжнародних перевезень та митного контролю Національного транспортного університету

Куник А.А. – аспірант Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Куц Г.О. – кандидат технічних наук, старший науковий співробітник, старший науковий співробітник відділу ефективності енерговикористання та оптимізації енергоспоживання Інституту загальної енергетики Національної академії наук України

Лебедев Д.Ю. – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри конструювання електронно обчислювальної апаратури Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Лебедев В.В. – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри технології пластичних мас і біологічно активних полімерів Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут»

Левкін А.В. – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри інформаційних технологій, кібернетики та захисту інформації Державного біотехнологічного університету

Левкін Д.А. – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри фізики та математики Державного біотехнологічного університету

Лисенко О.М. – доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри конструювання електронно-обчислювальної апаратури Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Лихошерстов Д.О. – аспірант кафедри конструювання електронно обчислювальної апаратури Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Ліночева О.В. – доктор технічних наук, професор, декан Хіміко-технологічного факультету Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Лісовець С.М. – кандидат технічних наук, доцент, завідувач кафедри автоматизованого управління технологічними процесами Таврійського національного університету імені В.І. Вернадського

Літвинчук С.І. – кандидат технічних наук, доцент, завідувач кафедри фізики Національного університету харчових технологій

Літвінова О.А. – магістрант кафедри комп'ютерних систем і технологій Харківського національного економічного університету імені Семена Кузнеця

Літинський В.В. – аспірант 1 курсу кафедри комп'ютеризованих систем та програмних технологій Національного університету «Одеська політехніка»

Ліхашорський С.В. – аспірант кафедри інформаційних радіоелектронних технологій і систем Вінницького національного технічного університету

Ляшенко О.М. – кандидат технічних наук, доцент кафедри програмних засобів і технологій Херсонського національного технічного університету

Майдан М.В. – аспірант кафедри комп'ютерної інженерії Національного університету «Львівська політехніка»

Майзеліс А.О. – доктор технічних наук, старший дослідник, доцент кафедри технічної електрохімії Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут»

Маринін А.І. – кандидат технічних наук, старший науковий співробітник, завідувач Проблемної науково-дослідної лабораторії Національного університету харчових технологій

Мірошникова М.В. – кандидат технічних наук, доцент кафедри «Логістичне управління та безпека руху на транспорті» Східноукраїнського національного університету імені Володимира Даля

Могилевич Д.І. – доктор технічних наук, професор, завідувач спеціальної кафедри № 3 Інституту спеціального зв'язку та захисту інформації Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Момот А.С. – доктор філософії, старший викладач кафедри автоматизації та систем неруйнівного контролю Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Морозов Д.С. – старший викладач кафедри комп'ютерних технологій у медицині та телекомунікаціях Державного університету «Житомирська політехніка»

Муравйов О.В. – кандидат технічних наук, доцент кафедри автоматизації та систем неруйнівного контролю Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Мухін О.В. – магістр кафедри системного проектування Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Нестерук А.О. – аспірант кафедри інформаційних систем та технологій, асистент кафедри інформаційних систем та технологій Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Николайчук М.Я. – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри інформаційно-телекомунікаційних технологій та систем Івано-Франківського національного технічного університету нафти і газу

Новіцька І.В. – кандидат педагогічних наук, доцент, доцент кафедри професійно-педагогічної освіти, андрагогіки та управління, зав. відділу аспірантури та докторантури Житомирського державного університету імені Івана Франка

Олещенко Л.М. – кандидат технічних наук, доцент кафедри програмного забезпечення комп'ютерних систем Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Омельченко В.В. – аспірант кафедри інформаційних систем та технологій Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Орлов А.А. – аспірант 3 курсу кафедри комп'ютеризованих систем та програмних технологій Національного університету «Одеська політехніка»

Осадчук О.В. – доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри інформаційних радіоелектронних технологій і систем Вінницького національного технічного університету

Осовцев А.В. – аспірант кафедри комп'ютерно-інтегрованих оптичних та навігаційних систем Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Павленко В.П. – старший науковий співробітник Українського науково-дослідного інституту спеціальної техніки та судових експертиз Служби безпеки України

Пазюк Р.І. – кандидат фізико-математичних наук, доцент кафедри фізики та інформаційних систем Дрогобицького державного педагогічного університету імені Івана Франка

Перекрыст А.Л. – доктор технічних наук, професор завідувач кафедри комп'ютерної інженерії та електроніки Кременчуцького національного університету імені Михайла Остроградського

Петрик В.О. – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри динаміки і міцності машин та опору матеріалів Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Побережна М.О. – магістрантка Державного університету «Житомирська політехніка»

Позняк О.М. – молодший науковий співробітник Проблемної науково-дослідної лабораторії Національного університету харчових технологій

Попель В.А. – начальник відділу науково-технічної експертизи Державного науково-дослідного інституту технологій кібербезпеки та захисту інформації

Потрашкова Л.В. – доктор економічних наук, доцент, професор кафедри комп'ютерних систем і технологій Харківського національного економічного університету імені Семена Кузнеця

Прачик В.В. – аспірант кафедри програмних засобів і технологій Херсонського національного технічного університету

Пулеко І.В. – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри комп'ютерної інженерії та кібербезпеки Державного університету «Житомирська політехніка»

Редько І.В. – доктор фізико-математичних наук, професор кафедри конструювання електронно-обчислювальної апаратури Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Ролік О.І. – професор, доктор технічних наук, завідувач кафедри інформаційних систем та технологій Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Романов О.І. – доктор технічних наук, професор кафедри телекомунікацій, Інституту телекомунікаційних систем Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Романюк В.А. – кандидат технічних наук, доцент кафедри тактико-спеціальної підготовки Національної академії Національної гвардії України

Руднева Л.Л. – кандидат технічних наук, доцент кафедри технологій природних і синтетичних полімерів, жирів та харчової продукції ДВНЗ «Український державний хіміко-технологічний університет»

Самойлов А.М. – старший викладач кафедри автоматизації та інформаційних систем Кременчуцького національного університету імені Михайла Остроградського

Сбоєв Р.Ю. – викладач Спеціальної кафедри № 3 Інституту спеціального зв'язку та захисту інформації Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Святненко Р.С. – кандидат технічних наук, старший науковий співробітник Проблемної науково-дослідної лабораторії Національного університету харчових технологій

Синявіна Ю.В. – кандидат економічних наук, доцент кафедри інформаційних технологій, кібернетики та захисту інформації Державного біотехнологічного університету

Сіденков Г.Г. – магістр кафедри інформаційних технологій Державного університету інфраструктури та технологій

Сікора О.В. – кандидат технічних наук, доцент кафедри фізики та інформаційних систем Дрогобицького державного педагогічного університету імені Івана Франка

Сірий О.А. – кандидат технічних наук, доцент кафедри теплової та альтернативної енергетики Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Скіба М.І. – доктор технічних наук, доцент, доцент кафедри екології та технології неорганічних речовин ДВНЗ «Український державний хіміко-технологічний університет»

Скілков Н.В. – аспірант кафедри системного програмування і спеціалізованих комп'ютерних систем Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Соколов К.А. – аспірант кафедри радіотехнічних систем радіотехнічного факультету Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Соломчак А.О. – аспірант кафедри інформаційно-телекомунікаційних технологій та систем Івано-Франківського національного технічного університету нафти і газу

Соломчак О.В. – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри електроенергетики, електротехніки та електромеханіки Івано-Франківського національного технічного університету нафти і газу

Стародубцев С.О. – кандидат військових наук, доцент кафедри тактико-спеціальної підготовки Національної академії Національної гвардії України

Стаценко В.В. – доктор технічних наук, доцент, професор кафедри комп'ютерної інженерії та електромеханіки Київського національного університету технологій та дизайну

Стаценко Д.В. – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри комп'ютерної інженерії та електромеханіки Київського національного університету технологій та дизайну

Сторожук М.С. – аспірант 1 курсу Навчально-наукового інституту атомної та теплової енергетики Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Сухий К.М. – доктор технічних наук, професор кафедри технологій палив, полімерних та поліграфічних матеріалів ДВНЗ «Український державний хіміко-технологічний університет»

Татарин О.В. – аспірант 1 курсу кафедри комп'ютеризованих систем та програмних технологій Національного університету «Одеська політехніка»

Тесленко О.І. – кандидат технічних наук, старший дослідник, провідний науковий співробітник відділу трансформації структури паливно-енергетичного комплексу Інституту загальної енергетики Національної академії наук України

Трокоз Я.Є. – кандидат технічних наук, доцент навчально-наукового інституту атомної та теплової енергетики Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Трубачев С.І. – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри динаміки і міцності машин та опору матеріалів Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Федулова В.С. – студент кафедри фізичної хімії Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Фесенко О.Д. – викладач кафедри технічного та метрологічного забезпечення факультету інформаційних технологій Військового інституту телекомунікацій та інформатизації імені Героїв Крут

Фомін О.В. – доктор технічних наук, професор кафедри «Вагони та вагонне господарство» Державного університету інфраструктури та технологій

Фомін О.О. – доктор технічних наук, професор, професор кафедри комп'ютеризованих систем та програмних технологій Національного університету «Одеська політехніка»

Фролова М.Е. – старший викладач кафедри філософії, політології та українознавства Херсонського національного технічного університету

Хазанович Ю.Ю. – аспірант кафедри автоматизації та систем неруйнівного контролю Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Хапченко О.В. – аспірант кафедри аспірант кафедри конструювання електронно-обчислювальної апаратури Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Хміль Р.В. – аспірант кафедри інформаційних технологій в телекомунікаціях Навчально-наукового інституту телекомунікаційних систем Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Хорошевська І.О. – кандидат економічних наук, доцент, доцент кафедри комп'ютерних систем і технологій Харківського національного економічного університету імені Семена Кузнеця

Хрокало Л.А. – кандидат біологічних наук, доцент, доцент кафедри фізичної хімії Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Черепанська І.Ю. – доктор технічних наук, професор кафедри автоматизації та систем неруйнівного контролю Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Черкашина Г.М. – кандидат технічних наук, професор, завідувач кафедри технології пластичних мас і біологічно активних полімерів Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут»

Чумаченко С.М. – доктор технічних наук, старший науковий співробітник, голова ГО «Асоціація фахівців цивільного захисту»

Шарипенко Ю.В. – студент кафедри транспортних технологій Національного університету «Запорізька політехніка»

Шевченко О.Ю. – доктор технічних наук, професор, головний науковий співробітник Проблемної науково-дослідної лабораторії Національного університету харчових технологій

Шibaєв О.Г. – доктор технічних наук, професор кафедри експлуатації флоту і технології морських перевезень Одеського національного морського університету

Шкурко Є.Л. – старший викладач кафедри бізнес-логістики та транспортних технологій факультету управління і технологій Інституту управління, технологій та права Державного університету інфраструктури та технологій

Шмігель Б.О. – доктор філософії, асистент кафедри інформаційно-комунікаційних технологій та систем Навчально-наукового інституту телекомунікаційних систем Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Яганов П.О. – кандидат технічних наук, доцент кафедри конструювання електронно-обчислювальної апаратури Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Янчук В.М. – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри робототехніки, електроенергетики та автоматизації імені професора Б.Б. Самотокіна Державного університету «Житомирська політехніка»

Яровий О.В. – начальник навчального відділу Інституту спеціального зв'язку та захисту інформації Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

НОТАТКИ

Науковий журнал

**ВЧЕНІ ЗАПИСКИ
ТАВРІЙСЬКОГО НАЦІОНАЛЬНОГО УНІВЕРСИТЕТУ
ІМЕНІ В.І. ВЕРНАДСЬКОГО**

Серія: Технічні науки

Том 34 (73) № 5 2023

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. 40,75. Ум. друк. арк. 47,43. Зам. № 1023/657

Підписано до друку 03.11.2023. 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.