

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ТАВРІЙСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
ІМЕНІ В.І. ВЕРНАДСЬКОГО**

Журнал заснований у 1918 році

**ВЧЕНІ ЗАПИСКИ
ТАВРІЙСЬКОГО НАЦІОНАЛЬНОГО УНІВЕРСИТЕТУ
ІМЕНІ В.І. ВЕРНАДСЬКОГО**

Серія: Технічні науки

Том 35 (74) № 2 2024



Видавничий дім
«Гельветика»
2024

Головний редактор:

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

Члени редакційної колегії:

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

**Рекомендовано до друку та поширення через мережу Internet
Вченою радою Таврійського національного університету імені В.І. Вернадського
(протокол № 14 від 23.05.2024 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, 2024

ЗМІСТ

ГАЛУЗЕВЕ МАШИНОБУДУВАННЯ

Сайчук О.В., Потоскаєв О.М.

ПІДВИЩЕННЯ ДОВГОВІЧНОСТІ ДЕТАЛЕЙ СІЛЬСЬКОГОСПОДАРСЬКОЇ ТЕХНІКИ
ІЗ ЗАСТОСУВАННЯМ НАНОСТРУКТУРНОГО БЕМІТУ.....1

РАДІОТЕХНІКА ТА ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЇ

Сушин І.О., Лисенко О.І.

УНІВЕРСАЛЬНА МЕТОДИКА ПЕРЕДАЧІ ДАНИХ ІЗ ЗАСТОСУВАННЯМ СЕНСОРІВ
СПРЯМОВАНОЇ ДІЇ.....6

ІНФОРМАТИКА, ОБЧИСЛЮВАЛЬНА ТЕХНІКА ТА АВТОМАТИЗАЦІЯ

Батюк С.Г., Васянович В.М., Ворошилов А.І.

СТРУКТУРНЕ ІМІТАЦІЙНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ТЕПЛОЕНЕРГЕТИЧНИХ ІНФОРМАЦІЙНО-
ВИМІРЮВАЛЬНИХ СИСТЕМ І СИСТЕМ ПРОГРАМНО-ЛОГІЧНОГО УПРАВЛІННЯ.....15

Батюк С.Г., Мар'янський М.О., Салівон Д.В., Федоров Д.Д.

ТЕПЛОЕНЕРГЕТИЧНІ СИСТЕМИ АВТОМАТИЧНОГО РЕГУЛЮВАННЯ
З СТРУКТУРНИМИ РЕГУЛЯТОРАМИ І ЦИФРОВИМИ ДВІЙНИКАМИ.....24

Батюк С.Г., Семенов А.Д.

КАСКАДНА СИСТЕМА АВТОМАТИЧНОГО РЕГУЛЮВАННЯ ТЕПЛООВОГО РЕЖИМУ
ПРОМИСЛОВОЇ ТОПКИ.....34

Бейрак Д.Я., Вакалюк Т.А.

ПІДХОДИ ДО ДЕКОМПОЗИЦІЇ ПРЕДМЕТНОЇ ОБЛАСТІ У ПОБУДОВІ
МІКРОСЕРВІСНИХ СИСТЕМ В НАУКОВІЙ ЛІТЕРАТУРІ.....44

Беляков Р.О.

МЕТОДИКА СИНТЕЗУ ТОПОЛОГІЇ НАЗЕМНО-ПОВІТРЯНОЇ КОМУНІКАЦІЙНОЇ МЕРЕЖІ
СПЕЦІАЛЬНОГО ПРИЗНАЧЕННЯ50

Бугаєва Л.М., Абрамова А.О., Крамаренко Д.П.

КОМП'ЮТЕРНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСУ ВИРОБНИЦТВА БІОДИЗЕЛЯ
У МІКРОРЕАКТОРІ.....58

Василенко В.М., Карпенко М.І., Скибінський А.С., Гуйда О.Г.

АНАЛІЗ ПЕРЕВАГ ТА ОБМЕЖЕНЬ LOW-CODE ПЛАТФОРМ НА ПРИКЛАДІ
WEBFLOW.COM.....65

Нладка О.М., Karpovich I.M., Sabaniuk A.Yu.

ARTIFICIAL NEURAL NETWORKS FOR ANALYSIS OF STOCK MARKET DYNAMICS.....71

Гончаров Д.С., Гончарова Н.В., Кандиба І.О.

АРХІТЕКТУРА БАГАТОРІВНЕВОЇ СИСТЕМИ МОНІТОРИНГУ СТАНУ ЗДОРОВ'Я ЛЮДИНИ...78

Дьячук Т.С., Шкрябець В.І., Тіменко А.В., Голуб Т.В.

АВТОМАТИЗОВАНА СИСТЕМА ГЕНЕРАЦІЇ ЗАВДАНЬ В НАВЧАЛЬНИХ КУРСАХ
З ПРОГРАМУВАННЯ.....85

Єремєєв І.С., Дичко А.О., Мінаєва Ю.Ю.

ЗАСТОСУВАННЯ ТЕОРІЇ КАТАСТРОФ ПРИ ДОСЛІДЖЕННІ НАСЛІДКІВ ПІДРИВУ
КАХОВСЬКОЇ ГЕС ТА ВІЙСЬКОВИХ ДІЙ У КРИМУ.....91

Купін А.І., Косей М.П.

ОГЛЯД АРХІТЕКТУРИ МУЛЬТИАГЕНТНИХ СИСТЕМ ТА АЛГОРИТМІВ
РОЙОВОГО ІНТЕЛЕКТУ.....98

Лісовець С.М., Ківа І.Л., Гуйда О.Г.

НЕРУЙНІВНИЙ АКУСТИЧНИЙ КОНТРОЛЬ ПОВЕРХНЕВОЇ ГУСТИНИ І ІНШИХ
ВЛАСТИВОСТЕЙ БАГАТОВІСНИХ ТКАНИН: ПЕРЕВАГИ І НЕДОЛІКИ.....105

Олещенко Л.М. ПРОГРАМНЕ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ДЛЯ АНАЛІЗУ ДАНИХ ПЛАТФОРМИ YOUTUBE.....	111
Петренко Д.В., Протасов А.Г. ОГЛЯД СУЧАСНИХ ТЕХНОЛОГІЙ ПІДВИЩЕННЯ АВТОНОМНОСТІ МОБІЛЬНИХ КОЛІСНИХ РОБОТІВ.....	122
Пилипенко В.О., Шевченко В.В., Гуменюк Т.С. АВТОМАТИЗОВАНА СИСТЕМА КОНТРОЛЮ ПРОЦЕСУ ОБРОБКИ ДЕТАЛЕЙ НА ОСНОВІ ЕЛЕКТРИЧНИХ СИГНАЛІВ.....	129
Рувінська В.М., Тройніна А.С. ІНФОРМАЦІЙНА ТЕХНОЛОГІЯ (МЕТОДИКА) РОЗРОБКИ НАВЧАЛЬНИХ КОМБІНАТОРНИХ ІГОР: ПРОДОВЖЕННЯ.....	136
Савіцький Р.С., Петрук О.О. РОЗРОБКА ПРОТОТИПУ ВЕБДОСТУПНОГО ІГРОВОГО СИМУЛЯТОРУ.....	143
Слабінога М.О., Пашковський Б.В., Афанасьєв Б.О. ПРОГРАМНА РЕАЛІЗАЦІЯ МЕХАНІЗМУ СИНХРОНІЗАЦІЇ ОБЛІКУ ТОВАРІВ ІНТЕРНЕТ-МАГАЗИНУ З ПОПУЛЯРНИМИ МАРКЕТПЛЕЙСАМИ.....	150
Сокульський О.Є., Топольськов Є.О., Жданова Ю.Д. АНАЛІЗ МОЖЛИВОСТЕЙ ІНФОРМАЦІЙНИХ ТЕХНОЛОГІЙ З ВИКОРИСТАННЯМ МІЖМАШИННОГО ЗВ'ЯЗКУ «М2М» ДЛЯ ІНТЕРНЕТУ РЕЧЕЙ.....	155
Stelmakh N.V., Mastenko I.V. CLASSIFICATION AND DETECTION OF DEFECTS IN TUBULAR PRODUCTS USING MACHINE VISION.....	167
Стешенко Я.В., Протасов А.Г. АВТОМАТИЗАЦІЯ ТЕХНОЛОГІЧНИХ ПРОЦЕСІВ ФОРМУВАННЯ АСФАЛЬТНО-БЕТОННИХ ПОКРИТТІВ.....	173
Ушкаренко О.О. ВИКОРИСТАННЯ МЕТОДУ СТРУКТУРНОГО АНАЛІЗУ ТА СИНТЕЗУ ПРИ ОПТИМІЗАЦІЇ МОДЕЛЕЙ СИСТЕМ КЕРУВАННЯ.....	182
Фант М.О. ПОРІВНЯЛЬНИЙ АНАЛІЗ НЕКОНТРОЛЬОВАНИХ МЕТОДІВ ОЦІНКИ ЕКСТРАКТИВНИХ АНОТАЦІЙ.....	190
Чернишова О.О., Домашенко С.В., Домашенко Д.Г. ВПЛИВ ШТУЧНОГО ІНТЕЛЕКТУ НА БІЗНЕС-ПРОЦЕСИ З МЕТОЮ ОПТИМІЗАЦІЇ ТА ПОКРАЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ РОБОТИ ОРГАНІЗАЦІЇ.....	196
ЕНЕРГЕТИКА	
Риндюк Д.В., Степанченко А.А. ВИЗНАЧЕННЯ ОПТИМАЛЬНИХ КОНСТРУКТИВНИХ ПАРАМЕТРІВ ПОВІТРЯНОГО ЦИКЛОНА ДЛЯ ГАЗОГЕНЕРАТОРА МАЛОЇ ПОТУЖНОСТІ.....	205
Черноусенко О.Ю., Бутовський Л.С., Рудик М.А., Доросевич В.С. СТЕНДОВІ ВИПРОБУВАННЯ НАТУРНОЇ ДВОЗОННОЇ ВИСОКОТЕМПЕРАТУРНОЇ КАМЕРИ ЗГОРЯННЯ.....	214
МЕТАЛУРГІЯ	
Єфімова В.Г., Смірнов О.М., Горюк М.С., Карпухін Є.О. ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ ТОВЩИНИ ПІНОКЕРАМІЧНИХ ФІЛЬТРІВ НА ВИДАЛЕННЯ НЕМЕТАЛЕВИХ ВКЛЮЧЕНЬ З РОЗПЛАВУ АЛЮМІНІУ.....	224
ХІМІЧНІ ТЕХНОЛОГІЇ	
Витяганець В.С., Пітак І.В. ОПТИМІЗАЦІЯ РЕЖИМУ РОБОТИ ТА КОНСТРУКЦІЇ ШАХТНОЇ ПЕЧІ ДЛЯ ВИРОБНИЦТВА ВАПНА.....	230

Глуховський В.В., Глуховський І.В. УДАРНОМІЦНІ ДИСПЕРСНО-АРМОВАНІ КОМПОЗИТИ НА ОСНОВІ НЕОРГАНІЧНИХ В'ЯЖУЧИХ ТА МІНЕРАЛЬНИХ ВОЛОКОН.....	240
Лесік С.М., Іваненко І.М. КОМПОЗИТНИЙ НІКЕЛЬ-ФЕРИТОВИЙ КАТАЛІЗАТОР ГІДРОЛІЗУ БОРОГІДРИДУ НАТРІЮ.....	246
Обушенко Т.І., Толстопалова Н.М., Сангінова О.В., Мацюк К.В. ДОСЛІДЖЕННЯ ФЛОТАЦІЙНОГО ОЧИЩЕННЯ СТІЧНИХ ВОД ШКІРЯНОГО ВИРОБНИЦТВА.....	252
Trembus I.V., Mykhailenko N.V., Hondovska A.S. USED PULPING LIQUORS APPLICATION IN OXIDATIVE – ORGANOSOLVENT TECHNOLOGY OF STRAW CELLULOSE PRODUCTION.....	258

ТРАНСПОРТ

Биковець Н.П. АНАЛІЗ ВПЛИВУ БІОБРОСТАННЯ КОРПУСУ СУДНА НА ДИНАМІКУ РУХУ СУДНА	264
Бондаренко Ю.А. СТРУКТУРА ТА ПАРАМЕТРИ СИСТЕМИ МОРСЬКИХ КОНТЕЙНЕРНИХ ПЕРЕВЕЗЕНЬ КОМПАНІЇ-ПЕРЕВІЗНИКА.....	271
Вінюков-Прошенко А.С. ПЕРСПЕКТИВИ РОЗВИТКУ РИНКУ АВІАЦІЙНИХ ВАНТАЖНИХ ПЕРЕВЕЗЕНЬ В УМОВАХ РОЗВИТКУ МІЖНАРОДНОЇ ЕЛЕКТРОННОЇ КОМЕРЦІЇ.....	280
Кириченко Г.І., Бердниченко Ю.А., Бердниченко Є.О., Юр'єв О.В. РОЗВИТОК ІНФОРМАЦІЙНИХ ТЕХНОЛОГІЙ НА ЗАЛІЗНИЦЯХ УКРАЇНИ: ВІД ОБЧИСЛЮВАЛЬНИХ МАШИН ДО СУЧАСНИХ СИСТЕМ УПРАВЛІННЯ.....	285
Кузьменко В.С., Гузь А.М., Кузьменко О.Ю. ОСОБЛИВОСТІ ПРОВЕДЕННЯ ІНСТРУКТАЖІВ З ПИТАНЬ ОХОРОНИ ПРАЦІ НА МОРСЬКОМУ СУДНІ.....	291
Кучма О.С. РАЦІОНАЛІЗАЦІЯ СИСТЕМ ОРГАНІЗАЦІЇ КОМПЛЕКСНОЇ МЕХАНІЗАЦІЇ Й АВТОМАТИЗАЦІЇ НАВАНТАЖУВАЛЬНО-РОЗВАНТАЖУВАЛЬНИХ РОБІТ У ПУНКТАХ СПОЛУЧЕННЯ АВІАЦІЙНОГО ТА ІНШИХ ВИДІВ ТРАНСПОРТУ.....	298
Ловська А.О., Мурад'ян А.О., Рукавішников П.В., Демидюков О.В. АНАЛІЗ МІЦНОСТІ КРИШКИ ЛЮКА УНІВЕРСАЛЬНОГО НАПІВВАГОНА ПРИ ПЕРЕВЕЗЕННІ В НЬОМУ КОНТЕЙНЕРІВ.....	304
Ловська А.О., Павлюченков М.В., Тесленко А.В. АНАЛІЗ НАВАНТАЖЕНОСТІ НЕСУЧОЇ КОНСТРУКЦІЇ НАПІВВАГОНА ПРИ ПЕРЕВЕЗЕННІ В НЬОМУ ГУСЕНИЧНОЇ ТЕХНІКИ	310
Лук'янченко О.Ю., Підгорний М.В. ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ФУНКЦІОНУВАННЯ АВТОМОБІЛІВ ОПЕРАТИВНИХ СЛУЖБ ШЛЯХОМ ЗАСТОСУВАННЯ ПРИНЦИПІВ ІНФОРМАЦІЙНО-ЛОГІСТИЧНИХ СИСТЕМ.....	316
Петров Л.М., Кішянус І.В., Лисий О.В., Верпівський С.М., Малиновський О.А., Нікішин В.А., Шелухін С.В. РОБОТ «ГЕРЕЦЬ» ДЛЯ СТВОРЕННЯ ПРОХОДІВ В МІННИХ ПОЛЯХ В ЗОНІ БОЙОВИХ ДІЙ.....	323
Шпак Н.Г., Лігачевський В.В. ДОСЛІДЖЕННЯ ВЗАЄМОДІЇ ТРАНСПОРТНО-ЕКСПЕДИТОРСЬКИХ ТА МИТНО-БРОКЕРСЬКИХ ПІДПРИЄМСТВ НА УМОВАХ АУТСОРСИНГУ.....	329
Шумило О.М. ТЕХНІЧНІ ТА ЕКОНОМІЧНІ АСПЕКТИ УПРАВЛІННЯ ЖИТТЄВИМ ЦИКЛОМ МОРСЬКОГО СУДНА.....	336

БУДІВНИЦТВО

Арінущкіна Н.С., Грищенко Т.М.

УКРІПЛЮВАЛЬНІ РОБОТИ ПРИ БУДІВНИЦТВІ ЗЕМЛЯНОГО ПОЛОТНА
АВТОМОБІЛЬНИХ ДОРІГ..... 345

ЕЛЕКТРОНІКА

Карягін Г.Є., Корнєв В.П.

ВИМІРЮВАЛЬНО-СИГНАЛІЗАЦІЙНИЙ КОМПЛЕКС СЕЙСМІЧНОГО ТИПУ..... 350

ОБРОБКА МАТЕРІАЛІВ У МАШИНОБУДУВАННІ

Рудик А.В., Рудик В.А.

ВПЛИВ ПОХИБОК НАЛАДКИ ВЕРСТАТУ НА ПОХИБКИ ОБРОБКИ
ПОВЕРХОНЬ ОБЕРТАННЯ..... 356

ВІДОМОСТІ ПРО АВТОРІВ..... 369

CONTENTS

INDUSTRIAL ENGINEERING

Saichuk O.V., Potoskaev O.M.

INCREASING THE DURABILITY OF AGRICULTURAL MACHINERY PARTS
USING NANOSTRUCTURED BOEHMITE.....1

RADIO ENGINEERING AND TELECOMMUNICATIONS

Sushyn I.O., Lysenko O.I.

UNIVERSAL METHOD OF DATA TRANSMISSION USING DIRECTED ACTION SENSORS.....6

INFORMATICS, COMPUTER ENGINEERING AND AUTOMATION

Batiuk S.G., Vasianovych V.M., Voroshylov A.I.

STRUCTURAL IMITATION MODELING OF THERMAL ENERGY INFORMATION-MEASURING
SYSTEMS AND SYSTEMS OF PROGRAM-LOGIC.....15

Batiuk S.G., Marianski M.O., Salivon D.V., Fedorov D.D.

THERMAL ENERGY SYSTEMS OF AUTOMATIC REGULATION WITH STRUCTURAL
REGULATORS AND DIGITAL TWINS.....24

Batiuk S.G., Semenov A.D.

CASCADE SYSTEM OF AUTOMATIC REGULATION OF INDUSTRIAL FURNACE
HEAT REGIME.....34

Beirak D.Ya., Vakaliuk T.A.

APPROACHES TO THE DOMAIN DECOMPOSITION OF MICROSERVICE SYSTEMS
IN THE SCIENTIFIC LITERATURE.....44

Bieliakov R.O.

METHODOLOGY FOR SYNTHESIZING THE TOPOLOGY
OF A SPECIAL-PURPOSE GROUND-AIR COMMUNICATION NETWORK.....50

Bugaieva L.M., Abramova A.O., Kramarenko D.P.

COMPUTER SIMULATION OF THE PROCESS OF BIODIESEL PRODUCTION
IN A MICRO-REACTOR.....58

Vasylenko V.M., Karpenko M.I., Skybinskyi A.S., Guida O.G.

ANALYSIS OF ADVANTAGES AND LIMITATIONS OF NO-CODE PLATFORMS
USING WEBFLOW.COM AS AN EXAMPLE.....65

Hladka O.M., Karpovich I.M., Sabaniuk A.Yu.

ARTIFICIAL NEURAL NETWORKS FOR ANALYSIS OF STOCK MARKET DYNAMICS.....71

Honcharov D.S., Honcharova N.V., Kandyba I.O.

ARCHITECTURE OF A MULTI-LEVEL HUMAN HEALTH MONITORING SYSTEM.....78

Diachuk T.S., Shkriabets V.I., Timenko A.V., Holub T.V.

AUTOMATED SYSTEM OF TASKS GENERATION FOR THE PROGRAMMING COURSES.....85

Yeremeev I.S., Dychko A.O., Minaeva Yu.Yu.

APPLICATION OF THE THEORY OF DISASTERS IN RESEARCH OF CONSEQUENCES
OF EXPLOSION OF THE KAKHOVKA HYDROELECTRIC POWER PLANT
AND MILITARY ACTIONS IN THE CRIMEA.....91

Kupin A.I., Kosei M.P.

OVERVIEW OF MULTI-AGENT SYSTEM ARCHITECTURES AND SWARM
INTELLIGENCE ALGORITHMS.....98

Lisovets S.M., Kiva I.L., Guida O.G.

NON-DESTRUCTIVE ACOUSTIC CONTROL OF SURFACE DENSITY AND OTHER
PROPERTIES OF MULTI-AXIAL FABRICS: ADVANTAGES AND DISADVANTAGES.....105

Oleshchenko L.M.

YOUTUBE PLATFORM DATA ANALYSIS SOFTWARE.....111

Petrenko D.V., Protasov A.G. OVERVIEW OF MODERN TECHNOLOGIES FOR INCREASING THE AUTONOMY OF MOBILE WHEELED ROBOTS.....	122
Pylypenko V.O., Shevchenko V.V., Humeniuk T.S. AUTOMATED SYSTEM FOR CONTROL OF THE MACHINING PROCESS BASED ON ELECTRICAL SIGNALS.....	129
Ruvinska V.M., Troynina A.S. INFORMATION TECHNOLOGY FOR THE DEVELOPMENT OF TRAINING COMBINATOR GAMES.....	136
Savitskyi R.S., Petruk O.O. THE WEB-ACCESSIBLE GAMING SIMULATOR PROTOTYPE DEVELOPMENT.....	143
Slabinoha M.O., Pashkovskiy B.V., Afanasiev B.O. SOFTWARE IMPLEMENTATION OF E-STORE PRODUCTS ACCOUNTING WITH THE ABILITY TO SYNCHRONIZE WITH POPULAR MARKETPLACES.....	150
Sokulskyi O.Ye., Topolskov Ye.O., Zhdanova Yu.D. ANALYSIS OF INFORMATION TECHNOLOGY CAPABILITIES USING MACHINE-TO-MACHINE COMMUNICATION (M2M) FOR THE INTERNET OF THINGS.....	155
Stelmakh N.V., Mastenko I.V. CLASSIFICATION AND DETECTION OF DEFECTS IN TUBULAR PRODUCTS USING MACHINE VISION.....	167
Steshenko Ya.V., Protasov A.G. AUTOMATION OF TECHNOLOGICAL PROCESSES OF FORMATION ASPHALT AND CONCRETE COATINGS.....	173
Ushkarenko O.O. USING THE METHOD OF STRUCTURAL ANALYSIS AND SYNTHESIS IN THE OPTIMIZATION OF CONTROL SYSTEM MODELS	182
Fant M.O. COMPARATIVE ANALYSIS OF UNSUPERVISED EVALUATION METHODS OF EXTRACTIVE SUMMARIZATIONS.....	190
Chernyshova O.O., Domashenko S.V., Domashenko D.H. THE INFLUENCE OF ARTIFICIAL INTELLIGENCE ON BUSINESS PROCESSES WITH THE PURPOSE OF OPTIMIZING AND IMPROVING THE EFFICIENCY OF THE ORGANIZATION.....	196
POWER ENGINEERING	
Rindyuk D.V., Stepanchenko A.A. DETERMINATION OF OPTIMAL DESIGN PARAMETERS OF AN AIR CYCLONE FOR A LOW-POWER GAS GENERATOR.....	205
Chernousenko O.Yu., Butovsky L.S., Rudik M.A., Dorosevich V.S. BENCH TESTS OF THE FULL-SCALE TWO-ZONE HIGH TEMPERATURE COMBUSTION CHAMBER.....	214
METALLURGY	
Yefimova V.G., Smirnov O.M., Goruk M.S., Karpuhin Yu.O. ADVANCED INCLUSION OF CERAMIC FILTERS TO THE COMPANY OF NON-METAL FILTERS, INCLUDING ALUMINUM ALLOY.....	224
CHEMICAL TECHNOLOGY	
Vytiahnets V.S., Pitak I.V. OPTIMIZATION OF THE OPERATING MODE AND DESIGN OF THE MINE FURNACE FOR LIME PRODUCTION.....	230

Glukhovskiy V.V., Glukhovskiy I.V. IMPACT-RESISTANT DISPERSION-REINFORCED COMPOSITES BASED ON INORGANIC BINDERS AND MINERAL FIBERS.....	240
Lesik S.M., Ivanenko I.M. COMPOSITE NICKEL-FERRITE CATALYST FOR HYDROLYSIS OF SODIUM BOROHYDRIDE....	246
Obushenko T.I., Tolstopalova N.M., Sanginova O.V., Matsiuk K.V. RESEARCH OF FLOTATION TREATMENT OF LEATHER MANUFACTURING WASTEWATER....	252
Trembus I.V., Mykhailenko N.V., Hondovska A.S. USED PULPING LIQUORS APPLICATION IN OXIDATIVE – ORGANOSOLVENT TECHNOLOGY OF STRAW CELLULOSE PRODUCTION.....	258

TRANSPORT

Bykovets N.P. ANALYSIS OF THE INFLUENCE OF SHIP HULL BIOFOULING ON SHIP'S DYNAMIC MOTION	264
Bondarenko Yu.A. STRUCTURE AND PARAMETERS OF THE CARRIER'S CONTAINER TRANSPORTATION SYSTEM	271
Viniukov-Proshchenko A.S. PROSPECTS FOR THE DEVELOPMENT OF THE AIR CARGO MARKET IN THE CONTEXT THE DEVELOPMENT OF INTERNATIONAL E-COMMERCE.....	280
Kyrychenko H.I., Berdnichenko Yu.F., Berdnichenko Ye.O., Yuriyev O.V. DEVELOPMENT OF INFORMATION TECHNOLOGIES IN UKRAINIAN RAILWAYS: FROM COMPUTING MACHINES TO MODERN MANAGEMENT SYSTEMS.....	285
Kuzmenko V.S., Guz A.M., Kuzmenko O.Yu. FEATURES OF CONDUCTING INSTRUCTIONS ON LABOR SAFETY ON MARINE VESSELS.....	291
Kuchma O.S. RATIONALISATION OF SYSTEMS FOR ORGANISING INTEGRATED MECHANISATION AND AUTOMATION OF LOADING AND UNLOADING OPERATIONS AT AIR AND OTHER TRANSPORT CONNECTION POINTS.....	298
Lovska A.O., Muradian A.O., Rukavishnikov P.V., Demydiakov O.V. ANALYSIS OF THE STRENGTH OF THE HATCH COVER OF A UNIVERSAL OPEN WAGON WHEN TRANSPORTING CONTAINERS IN IT.....	304
Lovska A.O., Pavliuchenkov M.V., Teslenko A.V. ANALYSIS OF LOADING OF THE BEARING STRUCTURE OF AN OPEN WAGON WHEN TRANSPORTING TRACKED MACHINERY.....	310
Lukianchenko O.Yu., Pidhornyy M.V. IMPROVING THE EFFICIENCY OF OPERATIONAL SERVICE VEHICLES BY APPLYING THE PRINCIPLES OF INFORMATION AND LOGISTICS SYSTEMS.....	316
Petrov L.M., Kishianus I.V., Lysyi O.V., Verpivskiy S.M., Malinovskiy O.A., Nikishyn V.A., Sheluhin S.V. ROBOT "HERETS" FOR CREATING PASSAGES IN MINEFIELDS IN A COMBAT ZONE.....	323
Shpak N.G., Litachevskiy V.V. STUDY OF THE INTERACTION OF TRANSPORT FORWARDING AND CUSTOMS BROKERAGE ENTERPRISES ON THE TERMS OF OUTSOURCING.....	329
Shumylo O.M. TECHNICAL AND ECONOMIC ASPECTS OF THE VESSEL LIFE CYCLE MANAGEMENT.....	336

CONSTRUCTION

Arinushkina N.S., Hryshchenko T.M. REINFORCEMENT WORKS DURING THE CONSTRUCTION OF THE EARTH SURFACE OF AUTOMOBILE ROADS.....	345
---	-----

ELECTRONICS

Kariahin G.Ye., Kornev V.P.

SEISMIC-TYPE MEASURING AND SIGNALING COMPLEX.....350

MATERIAL PROCESSING IN MECHANICAL ENGINEERING

Rudyk A.V., Rudyk V.A.

INFLUENCE OF MACHINE SETTING ERRORS ON ERRORS
IN THE PROCESSING OF ROTATING SURFACES.....356

INFORMATION ABOUT AUTHORS.....369

ГАЛУЗЕВЕ МАШИНОБУДУВАННЯ

УДК 62-1-7

DOI <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2024.2/01>**Сайчук О.В.**

Полтавський державний аграрний університет

Потоскаєв О.М.

Полтавський державний аграрний університет

ПІДВИЩЕННЯ ДОВГОВІЧНОСТІ ДЕТАЛЕЙ СІЛЬСЬКОГОСПОДАРСЬКОЇ ТЕХНІКИ ІЗ ЗАСТОСУВАННЯМ НАНОСТРУКТУРНОГО БЕМІТУ

У статті розглянуто роль нанотехнологій у технічній сфері АПК. Проаналізовано шляхи отримання та застосування наноструктурних гідроксидів та оксидів алюмінію. Досліджено фізико-хімічні властивості наноматеріалів, а також можливості та перспективи використання наноструктурного беміту для підвищення довговічності деталей та агрегатів сільськогосподарської техніки, покриттів та консолідованих матеріалів.

Сучасний розвиток сільського господарства передбачає технічне та технологічне оновлення виробництва у зв'язку із застарілим машинно-тракторним парком (МТП), низьким ресурсом техніки та включає не лише вдосконалення технічної оснащеності, а й ефективне використання технічних засобів агропромислового комплексу (АПК).

Наявність у сільському господарстві величезного парку машин, що працюють у контакті з ґрунтом, агресивними середовищами, обумовлює підвищені вимоги до їх надійності, якості технічного обслуговування та ремонту. Втрати металу в процесі експлуатації (знос, корозія) становлять десятки тисяч тонн, внаслідок чого доводиться витратити величезні матеріальні, енергетичні і трудові ресурси виробництва запасних частин, хоча у процесі експлуатації більшість деталей вибраковується при зносах робочих поверхонь. Сумарні збитки внаслідок корозії металу досягають у промислово розвинених країнах 4–5% національного доходу. Підвищити довговічність техніки, зменшити шкоду дозволяє використання корозійностійких матеріалів, серед яких найбільшу стійкість мають алюмооксидні.

Актуальність теми дослідження зумовлена необхідністю прискорення розвитку та вдосконалення технологій технічного сервісу для підвищення довговічності деталей; потребою активізації широкого використання в АПК наноматеріалів та досягнень нанотехнологій; необхідністю розробки нових матеріалів та технологій, що підвищують якість та ресурс деталей сільськогосподарської техніки.

Для забезпечення тривалої працездатності вузлів та агрегатів МТП особливо важливим є вдосконалення технологій обслуговування техніки, капітальний та поточний ремонт машин, активне використання досягнень наоіндустрії, зокрема нових штучних наноструктурних матеріалів.

Тому цілє даної наукової статті – розглянути теоретичні основи підвищення довговічності сільськогосподарської техніки з використанням наноструктурного беміту.

Ключові слова: наноструктурний беміт, наноматеріали, трибосполучення, гідротермальний синтез, газотермічне напilenня.

Постановка проблеми. Розробка та вдосконалення технологій ремонту та технічного обслуговування техніки, що дозволяють зменшити знос та тертя шляхом застосування трибопрепаратів та в результаті підвищити післяремонтний ресурс сільськогосподарських машин безсумнівно, є актуальним завданням. Пошук та створення нових конструкційних матеріалів у сучасних умо-

вах потребують великих капітальних вкладень. Процес цей розтягується на п'ять-десять років, що зовсім не відповідає динаміці науково-технічного розвитку та створенню техніки нового покоління. У зв'язку з цим поширюються нові технології, які знижують зношування і тертя в трисполученнях і суттєво продовжують ресурс машин та обладнання.

Одним із прогресивних та високоефективних методів відновлення поверхневих шарів деталей є газотермічне напилення (плазмове, газополум'яне, детонаційне) порошкових матеріалів. Метод дозволяє реалізувати в єдиному технологічному процесі одночасно відновлення геометричних розмірів і багаторазове збільшення терміну служби деталей за рахунок зміцнення, що виражається в підвищенні зносостійкості робочої поверхні, корозійної стійкості [1]. Крім вирішення завдань відновлення деталей, газотермічне напилення широко використовується для нанесення захисних покриттів на металеві та неметалічні поверхні.

Серед різноманітних методів підвищення якості деталей ґрунтообробної техніки перспективним є застосування керамічних матеріалів [2]. З керамічних матеріалів одним із лідерів є матеріали на основі оксиду алюмінію, які мають високу твердість і зносостійкість, невисоку вартість. В умовах суглинних ґрунтів деталі з корундової кераміки дозволяють підвищити зносостійкість та ресурс до 2–4 разів та забезпечити економію матеріальних, трудових та енерговитрат. Для обробки кам'янистих ґрунтів застосування корундової кераміки виявляється малоефективним через недостатню тріщиностійкість матеріалу. Підвищити тріщиностійкість матеріалу та довговічність деталей можна шляхом зменшення частки крихкого руйнування, за рахунок створення нанокомпозитів.

Проведений аналіз стану питання в галузі технічного сервісу дозволяє сформулювати наукову проблему, яка полягає в тому, що підвищення довговічності деталей та агрегатів сільськогосподарської техніки необхідно забезпечити за умов застарілого парку машин, недосконалості технологій технічного сервісу.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Наукові дослідження та аналіз передового досвіду показують, що одним із ефективних напрямів інноваційного розвитку в АПК є застосування нанотехнологій та наноматеріалів [3, с. 105]. Нанотехнології вже застосовуються при створенні нової сільськогосподарської техніки та технічному сервісі машин. Ефект проявляється у підвищенні довговічності деталей у кілька разів, зниженні коефіцієнта тертя та витрати енергії рухомих з'єднань машин та механізмів, втрат металу від корозії, поліпшенні екології сервісних підприємств.

Перехід від нанотехнології до індустрії наносистем і матеріалів належить до пріоритетних напрямів розвитку науки, технологій і техніки. Перспективність застосування нанотехнологій у різних сферах АПК досліджено такими вче-

ними, як Боровий М.О., Заячук Д.М., Кондир А.І., Азаренков М.О., Богуслаєв В.О. та інші.

Постановка завдання. Аналіз літератури показує, що застосування нанотехнологій при створенні нової сільськогосподарської техніки, технічному сервісі, біотехнології, рослинництві, тваринництві, переробці сільськогосподарської продукції дає потужний стрибок подальшому розвитку АПК. Аналіз теоретичних основ підвищення довговічності сільськогосподарської техніки з використанням наноструктурного беміту дозволить визначити основні напрямки для збільшення ресурсу за рахунок скорочення часу обкатки та швидкості зношування, підвищення рівня властивостей матеріалів і покриттів.

Виклад основного матеріалу. Наноінженерія поверхні тертьових деталей, тобто створення методів і технологій формування поверхонь з оптимальними міцнісними і триботехнічними властивостями є важливою областю наукових досліджень. Ресурс сільгосптехніки продовжується у 2–3 і більше разів без ремонту, із застосуванням відповідних марок наноматеріалів для кожного періоду експлуатації машин, що підтверджено не лише лабораторними та стендовими випробуваннями, а й моніторингом за тривалий період експлуатації [4, с. 21]. В умовах дефіциту фінансових засобів, недоступності якісних паливно-мастильних матеріалів проблема підтримки техніки у працездатному стані багато в чому може бути вирішена застосуванням спеціальних трибопрепаратів, розроблених на основі наноматеріалів та нанотехнологій.

Нанопрепарати дозволяють значно підвищити зносостійкість, скоротити тривалість і поліпшити якість припрацювання, підвищити пінтинг поверхонь у важко навантажених парах тертя, знизити температуру вузлів, що працюють, рівень шуму і вібрації, і в кінцевому підсумку збільшити ресурс і зменшити експлуатаційні витрати. Деякі з широко використовуваних трибопрепаратів не є наноматеріалами. Але, потрапляючи в зону високих температур та тисків, вони дробляться, руйнуються з утворенням наночастинок. Однак серпентин-мінерал природного походження та заміна його на штучні наноматеріали дозволяє розраховувати на підвищення стабільності властивостей трибоскладу. Перспективним є, на нашу думку, застосовувати для цих цілей беміт, штучний матеріал зі стабільними властивостями, який за багатьма характеристиками подібний до серпентинових мінералів.

Дослідження показали, що у наноструктурних покриттів із розмірами зерен менше 100 нм відбу-

вається різке покращення фізичних властивостей [5, с. 234]. Використання нанопорошкових матеріалів, у тому числі металокерамічних, призводить до підвищення ударної в'язкості, жаро- та зносостійкості, стійкості до абразивного зношування деталей та підвищення довговічності в 2–3 рази. Застосування нанотехнологій дозволяє як відновити деталі, так і збільшити їх ресурс до рівня нових. Завдяки унікальному комплексу фізико-хімічних властивостей як компонент наноматеріалів перспективним виявляється, на наш погляд, ширше застосування наноструктурних оксигідроксиду та оксиду алюмінію та композитів з їх застосуванням.

У оксигідроксиді алюмінію (AlOOH) відомі такі форми: діаспор, беміт, псевдобеміт. Методи одержання нанорозмірних порошоків можна розділити на диспергування механічним впливом, фізичні та хімічні методи [6]. Частинки, що виходять при диспергуванні, здебільшого мають розмір, що істотно перевищує характерні розміри наночастинок. Причиною наявності нижньої межі розміру (близько 1 мкм) є існування на певному етапі диспергування зворотного процесу – холодного зварювання або агломерації, і лише при застосуванні спеціальних прийомів та режимів для деяких матеріалів вдається знизити цей поріг.

Промисловість виробляє наноструктурні оксигідрокси алюмінію (переважно беміт і псевдобеміт) з тригідроксид алюмінію методом переосадження [7, с. 303]. Беміт є найкращим продуктом з технологічних причин і можливості отримати інші форми гідроксидів та оксидів алюмінію. Цей спосіб дозволяє практично за одну технологічну операцію виробляти продукт високої фазової та хімічної чистоти, без утворення побічних продуктів та стічних вод. Істотною перевагою способу є одержання одночасно з бемітом водню та теплової енергії. Розробка та впровадження даного способу дозволить не тільки виробляти затребуваний на ринку високочистий беміт, а й вирішити багато важливих енергетичних проблем, у тому числі створення економічно вигідних когенераційних установок [8, с. 57].

Відоме застосування беміту для створення захисних покриттів. Відзначено підвищення експлуатаційних параметрів за рахунок покращення фізико-механічних та структурних характеристик: суцільності, дрібнозернистості, твердості, зносостійкості та корозійної стійкості. Модифікуючий ефект від введення наноструктурних добавок забезпечується за оптимальної кількості наноконцентрації в загальній масі покриття [9, с. 115].

Використання при магнітно-абразивній обробці композиційних порошоків -залізо-наноструктурний

беміт – алмаз із полімерним сполученням забезпечує формування нанорельєфу (Rz не більше 100 нм) та підвищену інтенсивність знімання матеріалу до 10 разів [10]. Позитивні результати отримані при використанні наноструктурного беміту для створення каталізаторів очищення газів, що відпрацювали. Широко використовуються наноструктурні порошки беміту у виробництві каталізаторів та осушувачів. Властивість беміту утворювати пластичне тісто в кислому середовищі дозволяє формувати з нього вироби різної форми і складу без введення додаткового сполучного. Здібності гідроксидів алюмінію втрачати воду при нагріванні широко використовується для створення вогнестійких матеріалів.

Наноструктурні порошки гідроксиду та оксиду алюмінію знаходять застосування у різних композиціях з полімерами, бетоном та іншими матеріалами. Позитивні результати отримані під час використання беміту в обкатці дизельних двигунів [1]. Введення беміту в обкатувальний склад скоротило час обробки до двох разів.

Беручи до уваги фізико-хімічні властивості наноструктурного беміту і положення трибології, обґрунтування його ролі можна звести до такого:

- абразивне зношування і підшліфовування зон підвищеної шорсткості сполучень тертя, підвищення чистоти поверхонь, зниження механічної складової коефіцієнта тертя;

- очищення поверхонь тертя від нашарувань, оксидних плівок і дефектних структур, що забезпечує доступ речовин трибосередовища до ювенільних поверхонь металів і прискорює утворення антифрикційних покриттів;

- деяка подальша адсорбція на поверхнях частинок беміту смолистих речовин, що створює частинки, які розділяють деталі («третє тіло» в трибопарі), що зменшує коефіцієнт тертя;

- диспергація і розкладання беміту (з виділенням води), що зменшує перегрів оброблюваної поверхні контакту; шаруватість і гідратні оболонки на поверхні частинок, які сприяють зменшенню коефіцієнта тертя; каталітичний вплив на хімічні перетворення в зоні тертя;

- наноструктурна керамізація локальних дефектів з утворенням шару високої термостійкості, зносостійкості та високого електроопору (остання фаза в ланцюжку перетворень беміту є корундом). Кожна з перерахованих якостей може проявлятися на різних етапах перетворення частинок беміту в умовах тертя: спочатку більшу роль відіграють одні властивості, надалі інші.

При виробництві деталей дизельного двигуна (клапани, сидла, поршні) використання нанопорош-

кових матеріалів призводить до підвищення жаро- та зносостійкості. Використання металокерамічних нанопорошків при виробництві деталей обприскувачів та поливальної техніки (насадки, розпилювачі) призводить до підвищення стійкості до гідроабразивного зношування. Нанесення нанослоя з оксиду алюмінію на кожухи кормозбиральних комбайнів збільшує термін служби в кілька разів. Зміцнення ріжучих елементів ґрунтообробної техніки з використанням наночастинок з металокераміки підвищує довговічність у 2–3 рази.

Розглянуті вище сфери застосування наноструктурних порошків оксидів і гідроксидів алюмінію звичайно не охоплюють всіх сфер застосування цих матеріалів і ці області можуть бути розширені при проведенні відповідних досліджень. З огляду на сказане можна зробити висновки про перспективність використання наноструктурних гідроксидів та оксидів алюмінію для підвищення довговічності деталей та агрегатів сільськогосподарської техніки, покриттів та консолюдованих матеріалів, прискорення обкатки.

Підвищення ресурсу при експлуатації деталей та покриттів, отриманих із застосуванням наноструктурного беміту, визначається комплексом функціональних властивостей, що визначають довговічність виробу або покриття у конкретних умовах експлуатації. Сільськогосподарська техніка експлуатується переважно на відкритій місцевості, за умов контакту з абразивним середовищем (ґрунт). Зносостійкість, ударостійкість (тріщиностійкість), корозійна стійкість матеріалу є властивостями, що визначають довговічність деталей для цих умов застосування, наприклад, як матеріал робочих органів плуга. Інша сфера застосування наноструктурного беміту лежить у сфері одержання металевих виробів високої якості методом лиття, термічної обробки металевих деталей у загартованих печах. Для покриття ливарних форм визначальними є термостійкість та міцність покриття на стирання, термічна та хімічна стійкість. Для довговічності вогнеприпасу – висока термостійкість, міцність при кімнатній та підвищених температурах, низька повзучість.

Перспективним напрямом підвищення тріщиностійкості, ударної в'язкості руйнування є використання армуючих елементів в матричних матеріалах, тобто створення композиційних матеріалів. При виборі матеріалу компонентів важливими факторами є сумісність армуючого та матричного компонентів, простота технологічного процесу отримання матеріалу та виробів із нього. Найбільш простими у виробництві є композити, технологія одержання яких не відрізняється від

звичайних матеріалів. У нашому випадку це матеріали з матричною алюмооксидною основою, зі зміцнюючими частинками беміту. Композити при цьому зберігають цінні якості корундової кераміки: високий опір зношування, корозії та окислення, що робить ці матеріали перспективними для виготовлення деталей ґрунтообробної техніки та різних покриттів.

Для підвищення показників фізико-механічних властивостей та ліквідації відомої «нестачі» керамічних матеріалів, а саме низької тріщиностійкості та крихкості, ефективним є композитний підхід до формування структури. Введення наноструктурного беміту забезпечує підвищення тріщиностійкості за рахунок розсіювання енергії тріщин, яке може бути забезпечене шляхом створення в матриці мікропористих областей, оптимізованих за розміром та формою. Розсіювання енергії досягається шляхом затуплення тріщини або її відхилення.

Одночасно з підвищенням тріщиностійкості введення беміту може забезпечити створення дрібнозернистої структури. Відбувається пригнічення процесу рекристалізації нанокластерами беміту, що гальмують зростання зерен.

Таким чином, наноструктурний беміт забезпечує отримання композиту не тільки з високою тріщиностійкістю, але і підвищеною міцністю при крихкому руйнуванні, оскільки розвинена сітка міжзеренних кордонів є додатковою перешкодою для поширення тріщин. В результаті підвищується довговічність деталей за умов ударних впливів.

Нагрів беміту призводить до його фазових перетворень та утворення структур далеких від стану термодинамічної рівноваги. Такі структури утворюються у результаті дегідратації беміту, а й за поліморфних перетвореннях безводних форм оксиду алюмінію. Для наноструктурного беміту активність обумовлена також малим розміром частинок, що збільшує реакційну поверхню, скорочує шлях реагуючих речовин через шар новоутворень.

Основним технологічним принципом отримання наноструктурних матеріалів та виробів з них для ливарних технологій є забезпечення високої гомогенності складу протипригарного покриття при введенні до нього добавки дезагрегованого наноструктурного беміту, що сприяє покращенню технологічних властивостей суспензії, зокрема дозволяє підвищити седиментаційну стійкість, зменшити розшарування, підвищити якість.

Висновки. Внаслідок збільшення переважачого віку машин та низької ефективності існуючої системи обслуговування, ремонту та експлуатації

техніки, ресурс двигунів надзвичайно низький, що є однією з причин великих питомих витрат. Одне з рішень підвищення довговічності деталей та агрегатів сільськогосподарської техніки знаходиться у галузі нанотехнологій, зокрема у застосуванні наноматеріалів.

Завдяки унікальному комплексу фізико-хімічних властивостей перспективним для підвищення довговічності деталей і агрегатів сільськогосподарської техніки, прискорення обкатки є застосування наноструктурних матеріалів, зокрема – наноструктурного беміту.

Список літератури:

1. Рибалко І.М., Лукаш В.С. Застосування нанотехнологій в машинобудуванні. *Молодь і індустрія 4.0 в XXI столітті: матеріали XIX міжнародного форуму молоді* (Харків, 06–07 квітня 2023 р.). Харків: ДБТУ. 2023. С. 128.
2. Фесенко О.М., Ковальчук С.В., Нищик Р.А. Проблеми та перспективи розвитку нанотехнологій в Україні та світі. *Маркетинг і менеджмент інновацій*. 2017. № 1. С. 170-179.
3. Боровий М.О., Куницький Ю.А., Каленик О.О., Овсієнко І.В., Цареградська Т.Л. Наноматеріали, нанотехнології, нанопристрої. Київ. 2015. 350 с.
4. Панченко С.П. Функціональні наноматеріали. Д: НТУ ДП, 2022. 47 с.
5. Заячук Д.М. Нанотехнології і наноструктури Л: Львівська політехніка. 2009. 580 с.
6. Новиков Н.В., Клименко С.А., Бочечка А.А. Наноматеріали у технологіях механічної обробки. *Процеси механічної обробки в машинобудуванні*. 2012. Вип. 13. С. 153-171.
7. Кондир А.І. Наноматеріалознавство і нанотехнології. Львів: Львівська політехніка, 2016. 450 с.
8. Богуслаєв В.О., Качан О.Я., Калініна Н.Є. Наноматеріали і нанотехнології. Запоріжжя. 2015. 202 с.
9. Азарєнков М.О., Неклюдов І. М., Береснев В.М. Наноматеріали і нанотехнології: навч. посібник. Харків: ХНУ імені В. Н. Каразіна. 2014. 316 с.
10. Б.Є. Патон, В.Ф. Москаленко, І.С. Чекман, Б.О. Мовчан. Нанонаука і нанотехнології: технічний, медичний та соціальний аспекти. *Вісник національної академії наук України*. № 6. 2009. С. 18-26.

Saichuk O.V., Potoskaev O.M. INCREASING THE DURABILITY OF AGRICULTURAL MACHINERY PARTS USING NANOSTRUCTURED BOEHMITE

The article examines the role of nanotechnology in the technical sphere of the agro-industrial complex. The methods of extraction and hardening of nanostructured hydroxides and aluminum oxides, as well as the feasibility and prospects for the use of nanostructured hydroxides and aluminum oxides to improve the durability of parts and assemblies of agricultural machinery have been analyzed. advanced technology, coating and consolidated materials, accelerated running-in.

Modern development of agriculture provides for the technical and technological renewal of production in connection with the outdated machine and tractor fleet (MTF), low service life of equipment and includes not only the improvement of technical equipment, but also the effective use of technical means of the agro-industrial complex (MTF).

The presence in agriculture of a huge fleet of machines operating in contact with soil and aggressive environments determines increased requirements for their reliability, quality of maintenance and repair. The loss of metal under these conditions during operation (wear, corrosion) amounts to tens of thousands of tons, as a result of which it is necessary to spend enormous material, energy and labor resources on the production of spare parts, although during operation most parts are rejected when the wear of the working surfaces does not exceed 1–2% by weight of parts. The total damage resulting from metal corrosion reaches 4–5% of national income in industrialized countries. The use of corrosion-resistant materials, among which aluminum oxide materials, are the most resistant, can increase the durability of equipment and reduce damage.

The relevance of the research topic is due to the need to accelerate the development and improvement of technical service technologies to increase the durability of parts; the need to activate a broad the use of nanomaterials and nanotechnology achievements in the agricultural sector; the need to develop new materials and technologies that improve the quality and service life of agricultural machinery parts.

Ensure long-term operability of MTF components and assemblies, it is especially important to improve equipment maintenance technologies, major and current repairs of machines, and the active use of nanoindustry achievements, including new artificial nanostructured materials.

Therefore, the purpose of this scientific article is to consider the theoretical foundations of increasing the durability of agricultural machinery using nanostructured boehmite.

Key words: nanostructured boehmite, nanomaterials, tribocombination, hydrothermal synthesis, gas thermal spraying.

РАДІОТЕХНІКА ТА ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЇ

УДК 621.391

DOI <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2024.2/02>

Сушин І.О.

Національний технічний університет України

«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Лисенко О.І.

Національний технічний університет України

«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

УНІВЕРСАЛЬНА МЕТОДИКА ПЕРЕДАЧІ ДАНИХ ІЗ ЗАСТОСУВАННЯМ СЕНСОРІВ СПРЯМОВАНОЇ ДІЇ

Сенсорні вузли є невід'ємними компонентами безпроводових сенсорних мереж, які оснащуються змінними або постійними антенами. Використання ефективних антен та їх вдосконалення є актуальним питанням у галузі. Тому у статті було проаналізовано та порівняно сучасні антени для мобільних пристроїв спрямованої та всеспрямованої дії за допомогою яких можливо організувати зв'язність вузлів мобільних безпроводових сенсорних мереж з телекомунікаційними аероплатформ (ТА) на базі БПЛА гелікоптерного та літакового типів. Правильний вибір антен для вузлів МБСМ є важливим фактором для досягнення необхідних параметрів мережі: часу функціонування, мінімальної кількості необхідних БПЛА, пропускної здатності тощо. В більшості мобільних пристроїв (а також сенсорних вузлах) використовуються антени всеспрямованої дії, що не завжди є рішенням, яке задовольняє усі вимоги, тому існує необхідність в ефективному використанні енергетичного ресурсу вузлів із застосуванням антен спрямованої дії. Це створює наукову задачу, яка полягає у розробці методики передачі даних із використанням сенсорів спрямованої дії з урахуванням можливості застосування у багаторівневих наземно-повітряних мережах (НПМ). Виконано теоретичний розрахунок довжини лінії зв'язку ТА-вузол. Отримані результати підтверджуються при моделюванні у програмному комплексі Atoll. За допомогою викладених двох підходів було порівняно пропускну здатність лінії зв'язку при різних вхідних параметрах мережі та відстані лінії зв'язку із застосуванням антен всеспрямованої, спрямованої та вузькоспрямованої дії. На основі отриманих залежностей створений алгоритм реалізації методу передачі даних із використанням сенсорів спрямованої дії. Це дасть можливість його застосування при створенні передових НПМ великої дальності зі збільшеною пропускну здатністю.

Ключові слова: МБСМ, телекомунікаційна аероплатформа, сенсорні вузли, спрямовані антени, БПЛА.

Постановка проблеми. Зростаюча популярність мобільних безпроводових мереж на тлі великої кількості природних лих, війн тощо, ставить нові виклики до розвитку наземно-повітряних мереж у цивільних та військових сферах, а саме до організації та покращення зв'язності між мережевими елементами (вузлами та БПЛА).

Зазвичай сенсорний вузол МБСМ складається із всеспрямованої антени вбудованого чи зовнішнього типу [1,2], але не завжди це дозволяє досягнути необхідної відстані лінії зв'язку, пропускної здатності тощо. Також не менш важливим є завдання ефективного використання наявного обмеженого енергетичного ресурсу мобільних

пристроїв. Тому варто розглянути сценарій використання спрямованих антен [3-6], що дозволить покращити вказані вище параметри. Питання оптимального вибору антенних систем стає все актуальнішим, особливо при застосуванні у НПМ.

Вдосконалення НПМ полягає у збільшенні часу функціонування, зменшенні мінімально необхідної кількості мережових елементів (БПЛА, вузлів), досягненні необхідної пропускної здатності тощо. А отже, необхідним стає порівняння параметрів лінії зв'язку (відстані, пропускної здатності) при використанні спрямованих та всеспрямованих антен вузлів та створення універсальної методики передачі даних із використанням сен-

сорів спрямованої дії. Це дозволить покращити основні параметри при постановці мінімально необхідних вимог до мережі.

Аналіз останніх досліджень і публікацій.

На даний час сенсори (вузли) всеспрямованої дії у МБСМ є класичним варіантом пристроїв, які можуть приймати або передавати сигнал в усіх напрямках навколо них. Вони охоплюють (покривають) повне коло навколо своєї точки кріплення (згідно діаграми спрямованості антени, що використовується пристроєм), що робить їх придатними для застосувань, коли події або зміни в середовищі можуть відбуватися з будь-якого напрямку, тобто область покриття має дозволяти їм передавати дані на центральний вузол або інші датчики поблизу. Коефіцієнт підсилення даних антен складає від 1.94 до 5 dB. Споживання електроенергії є критичним фактором для сенсорних вузлів, особливо у МБСМ, що працюють від одноразових або багаторазових джерел живлення. Також всеспрямовані датчики можуть зіткнутися з проблемами, такими як перешкоди від інших пристроїв, обмежену дію на великих відстанях і потребу в ефективних алгоритмах обробки даних для отримання інформації, які передає вузол [7-9].

Для усунення зазначених недоліків всеспрямованих антен доцільно використовувати спрямовані антени. Вони відіграють вирішальну роль у МБСМ із використанням БПЛА, фокусуючи своє випромінювання в певному напрямку (підсилення для антен може коливатися від 6 до 40 дБ), що призводить до збільшення області покриття в цільовому напрямку. Це особливо корисно для зв'язку на великі відстані, так як забезпечується більший коефіцієнт підсилення порівняно з всеспрямованими антенами, що призводить до покращення рівня сигналу на приймаючій стороні.

Постановка завдання. Відсутність ефективного використання енергетичного ресурсу вузлів МБСМ при використанні БПЛА є одним з основних напрямків вдосконалення НПМ військового та цивільного призначення.

Основна кількість вузлів всеспрямованої дії показує необхідність впровадження та розвитку спрямованих антен для збільшення довжини каналу зв'язку ТА-вузол або його пропускної здатності.

Виходячи з існуючого напрямку досліджень можна сказати, що існує потреба у розробці ефективної універсальної методики передачі інформації із використанням сенсорів спрямованої дії, яку можна використовувати для різних протоколів передачі даних.

Виклад основного матеріалу. Сучасні МБСМ використовують велике розмаїття протоколів передачі даних (NB-IOT, Bluetooth LoRaWAN, IEEE 802.11, 802.16 тощо). Після їх аналізу та порівняння було обрано IEEE 802.11ax, так як він має найбільшу максимальну смугу пропускання (з можливістю її зміни під необхідні задачі) при відносно невеликому споживанні енергії, що дозволяє досягти необхідної пропускної здатності для виконання поставлених задач. Також в даному стандарті передбачений механізм економії енергії, який дозволяє переводити вузли у режим очікування (без витрат енергії), коли вузол не виконує передачу даних або знаходиться не в зоні покриття БПЛА. В залежності від того який режим роботи буде обраний, встановлюються такі параметри як смуга пропускання, чутливість приймача; буде змінюватися швидкість та пікове споживання енергії [10,11].

Виходячи із характеристик режимів роботи IEEE 802.11ax отримуємо залежності (рис. 1) на яких видно, що максимальна швидкість зростає пропорційно збільшенню мінімально необхідної чутливості приймача.

Виходячи із наявних вихідних даних можливо також встановити залежність довжини лінії зв'язку від чутливості приймача. Для цього необхідно скористатися формулою 1 розрахунку мінімальної чутливості приймача [12]:

$$P_{прм} = P_{прд} - L_{АФТ_1} + G_{прм} - L_{мед} - L_{зан} + G_{прд} - L_{АФТ_2}, \quad (1)$$

де $G_{прм}$ та $G_{прд}$ – коефіцієнти підсилення приймальної та передавальної антен у dB. $L_{мед}$ – медіанні втрати потужності ЕМХ викликані втратами у вільному просторі, в гідрометеорах та за рахунок дифракції у dB:

$$L_{мед} = L_{віл} + L_{атм} + L_{дифр} \quad (2)$$

В даному випадку $L_{дифр[dB]} = 0$, а втрати у вільному просторі (ITU-R P.525):

$$L_{віл} = 20 \lg \left(\frac{4\pi r}{\lambda} \right) = 32,5 + 20 \lg(f) + 20 \lg(r) \quad (3)$$

Отримане рівняння розрахунку довжини траси:

$$20 \lg(r) + (\gamma_{сух.ловітря} + \gamma_{H_2O})r = -32,5 - 20 \lg(f) - P_{прм} + P_{прд} - L_{АФТ_1} - L_{АФТ_2} - L_{зан} + G_{прм} + G_{прд} \quad (4)$$

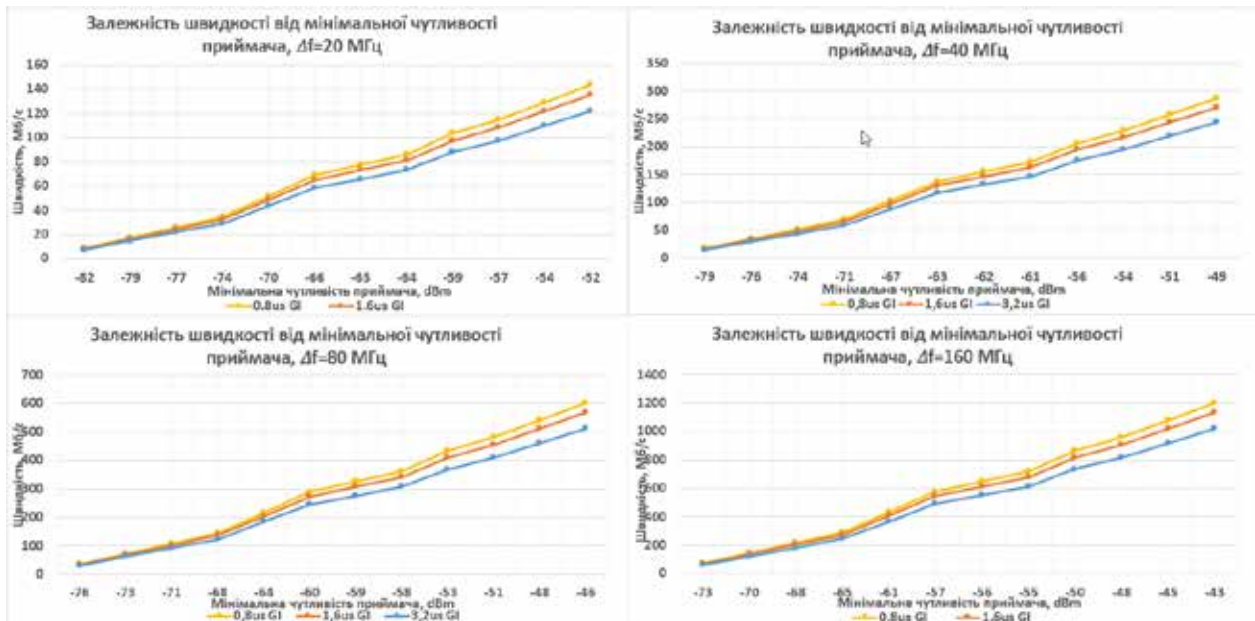


Рис. 1. Залежність швидкості від мінімальної чутливості приймача при смузі пропускання 20, 40, 80, 160 МГц

Проведемо розрахунки довжини каналу зв'язку від мінімальної чутливості приймача при використанні спрямованої антени для двох робочих частот 5200 МГц та 2447 МГц, тому втрати в гідрометеорах будуть мати наступні значення:

В сухому повітрі:

$$\gamma_{\text{сух.повітря}} = 7,1 * 10^{-3} \frac{dB}{km} \text{ для } 5200 \text{ МГц}$$

$$\gamma_{\text{сух.повітря}} = 7 * 10^{-3} \frac{dB}{km} \text{ для } 2447 \text{ МГц}$$

В парах води:

$$\gamma_{H_2O} = 1,7 * 10^{-3} \frac{dB}{km} \text{ для } 5200 \text{ МГц}$$

$$\gamma_{H_2O} = 0 \frac{dB}{km} \text{ для } 2447 \text{ МГц}$$

Потужність передавача у систем стандарту 802.11ах $P_{\text{прд}} = 15 - 30 \text{ dBm}$ (для розрахунку обрані значення 15, 25, 30 dBm). Робоча частота знаходиться у двох діапазонах 2400 МГц – 24835 МГц та 5150 МГц – 7125 МГц (для розрахунку візьмемо значення $f = 5200 \text{ МГц}$ та $f = 2447 \text{ МГц}$). Так як антена з'єднується безпосередньо до плати у БПЛА та вузлах, то втрати в АФТ будуть мінімальні. Прийемо їх $L_{\text{АФТ}_1} = L_{\text{АФТ}_2} = 0,1 \text{ dB}$.

Розрахунок довжини лінії зв'язку був виконаний двома способами: теоретичний та за допомогою програмного комплексу Atoll із потужностями $P_{\text{прд}} = 15, 25, 30 \text{ dBm}$ для двох блоків порівнянь:

1. Із використанням спрямованої антени ($G = 17 \text{ dB}$) для БПЛА із спрямованою ($G = 17 \text{ dB}$) та всеспрямованою ($G = 5 \text{ dB}$) антенами вузла відповідно (рис. 2–4).

2. Із використанням всеспрямованої антени БПЛА ($G = 6 \text{ dB}$) та вузькоспрямованої антени ($G = 40 \text{ dB}$) вузла (рис. 5).

Як бачимо залежності при різних вхідних значеннях коефіцієнтів підсилення, потужностей передавача та робочих частотах мають однакову експоненційну залежність та спадний характер. Тобто при збільшенні мінімально необхідної чутливості приймача зменшується максимальна відстань каналу зв'язку. Також значення теоретичного розрахунку підтверджуються розрахунком за допомогою Atoll. З отриманих результатів першого блоку порівнянь можна зробити висновок, що з використанням сенсорів спрямованої дії (у порівнянні с сенсорами всеспрямованої дії) при однакових інших умовах можна досягти збільшення висоти розташування (або відстані до вузла) телекомунікаційних аероплатформ.

Слід звернути увагу на те, що максимальна довжина лінії зв'язку обмежується пропускною здатністю каналу зв'язку. Тому другий блок порівнянь показує, що при використанні вузькоспрямованої антени ($G = 40 \text{ dB}$) можливо збільшити пропускну здатність (або зменшити витрати енергії при зменшенні потужності передавача з та пропускної здатності) при умові розташування БПЛА 1-го рівня на висоті від пів кілометра до одиниць кілометрів. Виходячи із отриманих сімейств гра-

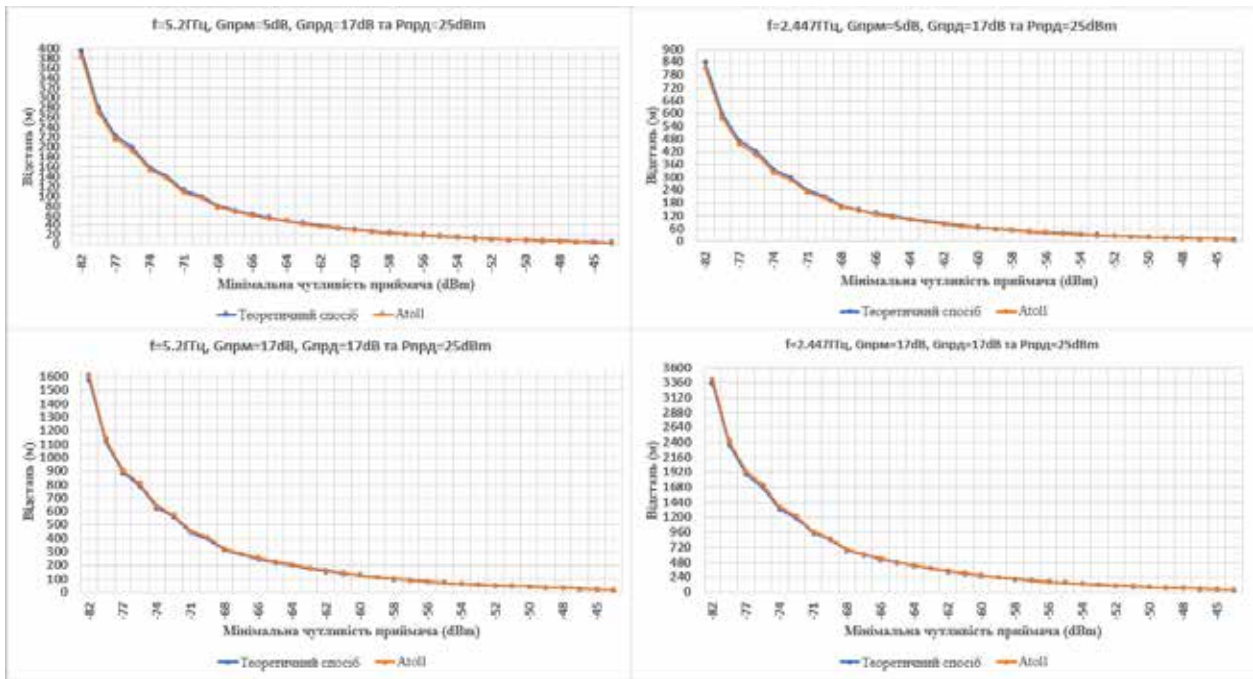


Рис. 2. Залежність мінімальної чутливості приймача від відстані при потужності передавача $P_{\text{прд}} = 25 \text{ dBm}$

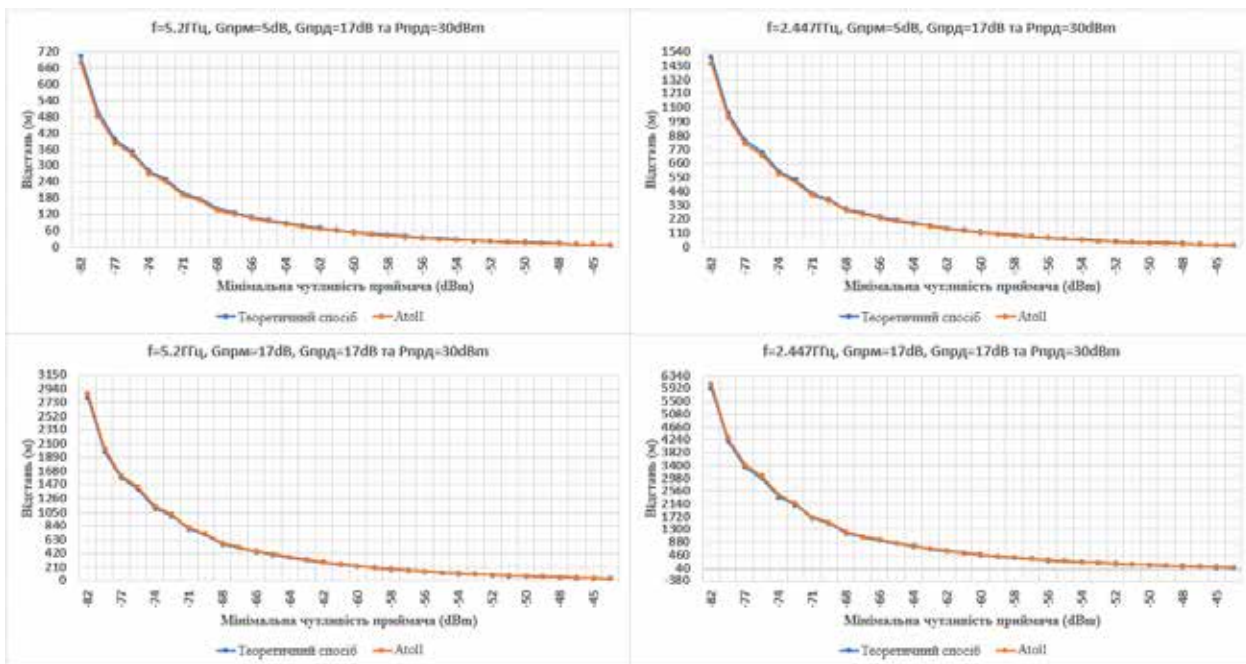


Рис. 3. Залежність мінімальної чутливості приймача від відстані при потужності передавача $P_{\text{прд}} = 30 \text{ dBm}$

фіків залежності швидкості від мінімальної чутливості передавача (рис. 1) та залежності відстані від мінімальної чутливості передавача (рис. 2–5) можна зробити висновок, що максимальна швидкість передачі даних зменшується зі збільшенням довжини каналу зв'язку. Одна із отриманих залежностей наведена як приклад у табл. 1.

Отримавши результати розрахунків та моделювання при використанні спрямованих антен та виграш (в порівнянні із всеспрямованими антенами) у відстані та пропускній здатності при заданій потужності передавача перейдемо до алгоритму, що реалізує метод передачі даних із використанням сенсорів спрямованої дії.

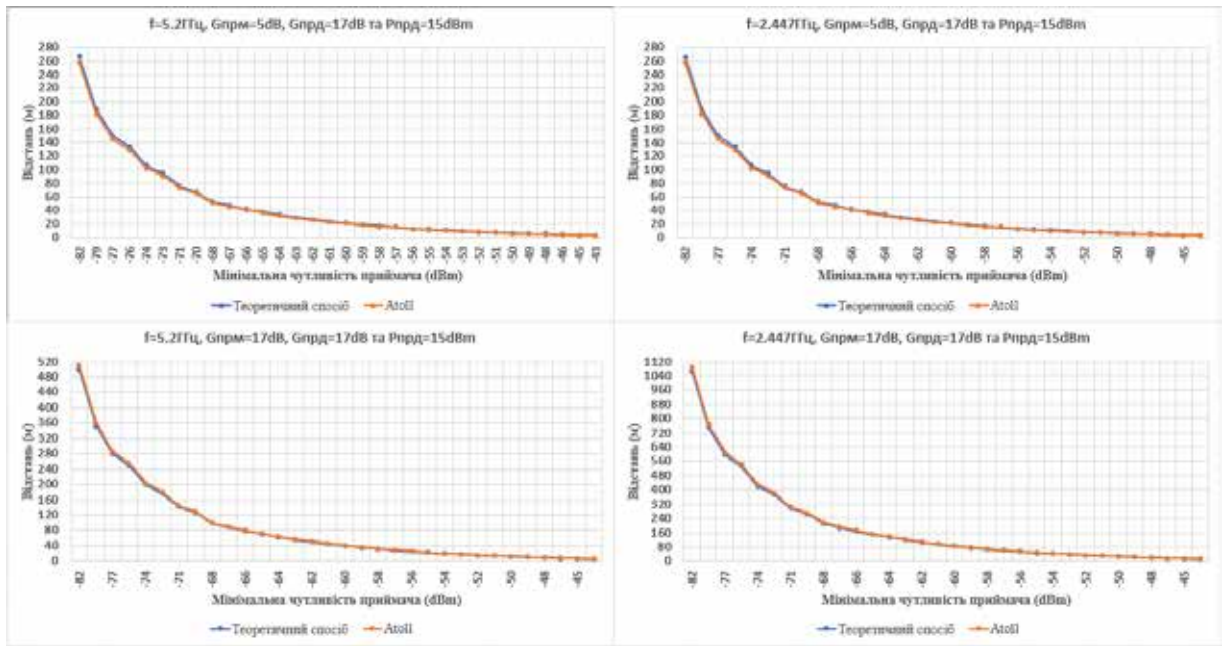


Рис. 4. Залежність мінімальної чутливості приймача від відстані при потужності передавача $P_{\text{прд}} = 15 \text{ dBm}$

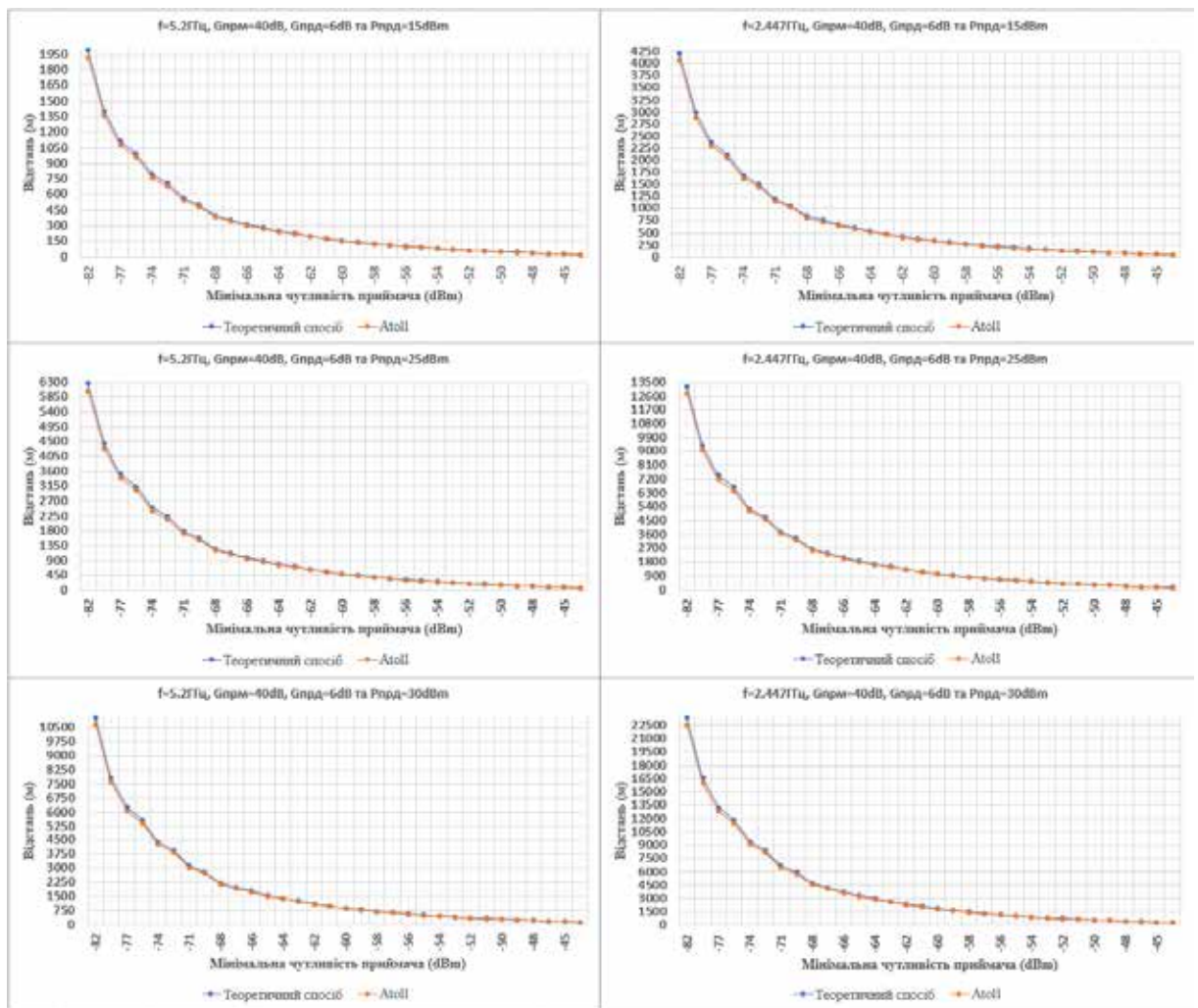


Рис. 5. Залежність мінімальної чутливості приймача від відстані при потужності передавача $P_{\text{прд}} = 15, 25, 30 \text{ dBm}$ з використанням всепрямованої антени $G = 6 \text{ dB}$ та вузькоспрямованої антени $G = 40 \text{ dB}$

Схема даного алгоритму зображена на рис. 6, а основні етапи наступні:

1. Задання параметрів лінії зв'язку, а саме: коефіцієнтів підсилення антен $G_{прм}$ та $G_{прд}$, потужності передавача $P_{прд}$, енергетичного запасу лінії $L_{зан}$, відстань $r = [r_{min}, r_{max}]$, гранична швидкість передачі даних $s_{зад}$.

2. Знаходження доступного діапазону частот та смуг пропускання.

3. Перевірка пріоритету цільової функції $s \rightarrow max$. Якщо так, то перейти до пункту 3.1. В інакшому випадку перехід до пункту 4.

3.1. Реалізація правил максимізації пропускної здатності із перевіркою $s_{зад} \geq s_{max}$ (пункт 3.2):

а) збільшення смуги пропускання;

б) зменшення робочої частоти до діапазону 2.4 ГГц;

в) збільшення потужності передавача.

Таблиця 1

Залежність пропускної здатності від довжини каналу зв'язку при використанні спрямованої ($G = 17$ dB) та всеспрямованої ($G = 5$ dB) антен вузлів на частоті 5200 МГц із енергетичним запасом 30 dB з використанням спрямованої антени ($G = 17$ dB) та потужністю передача 25 dBm (теоретичний розрахунок та за допомогою Atoll)

MCS	DCM	Ширина каналу 20 МГц					Ширина каналу 40 МГц				
		Швидкість, Мб/с			Відстань, м		Швидкість, Мб/с			Відстань, м	
		0.8us GI	1.6us GI	3.2us GI	G = 5 dB	G = 17 dB	0.8us GI	1.6us GI	3.2us GI	G = 5 dB	G = 17 dB
0	1	4.3	4	3.6	397/384	1579/1614	8.6	8.1	7.3	281/271	1118/1143
	0	8.6	8.1	7.3			17.2	16.3	14.6		
1	1	8.6	8.1	7.3	281/271	1118/1143	17.2	16.3	14.6	199/192	792/810
	0	17.2	16.3	14.6			34.4	32.5	29.3		
2	-	25.8	24.2	21.9	223/216	888/908	51.6	48.8	43.9	158/153	629/643
3	1	17.2	16.3	14.6	158/153	629/643	34.4	32.5	29.3	112/108	445/456
	0	34.4	32.5	29.3			68.8	65	58.5		
4	1	25.8	24.2	21.9	100/96	397/407	51.6	48.8	43.9	71/68	281/288
	0	51.6	48.8	43.9			103.2	97.5	87.8		
5	-	68.8	65	58.5	63/61	250/256	137.6	130	117	45/43	177/181
6	-	77.4	73.1	65.8	56/54	223/228	154.9	146.3	131.6	40/38	158/162
7	-	86	81.3	73.1	50/49	199/204	172.1	162.5	146.3	35/34	141/144
8	-	103.2	97.5	87.8	28/27	111/115	206.5	195	175.5	20/19	80/81
9	-	114.7	108.3	97.5	22	90/91	229.4	216.7	195	16/15	63/64
10	-	129	121.9	109.7	16/15	63/64	258.1	243.8	219.4	11	45
11	-	143.4	135.4	121.9	13/12	50/51	286.8	270.8	243.8	8.8/9	35/36
MCS	DCM	Ширина каналу 80 МГц					Ширина каналу 160 МГц				
		Швидкість, Мб/с			Відстань, м		Швидкість, Мб/с			Відстань, м	
		0.8us GI	1.6us GI	3.2us GI	G = 5 dB	G = 17 dB	0.8us GI	1.6us GI	3.2us GI	G = 5 dB	G = 17 dB
0	1	18	17	15.3	199/192	792/810	36	34	30.6	140/136	561/573
	0	36	34	30.6			72.1	68.1	61.3		
1	1	36	34	30.6	140/136	561/573	72.1	68.1	61.3	100/96	397/407
	0	72.1	68.1	61.3			144.1	136.1	122.5		
2	-	108.1	102.1	91.9	112/108	445/456	216.2	204.2	183.8	80/77	315/323
3	1	72.1	68.1	61.3	80/77	315/323	144.1	136.1	122.5	56/54	223/228
	0	144.1	136.1	122.5			288.2	272.2	245		
4	1	108.1	102.1	91.9	50/49	199/204	216.2	204.2	183.8	35/34	141/144
	0	216.2	204.2	183.8			432.4	408.3	367.5		
5	-	288.2	272.2	245	32/30	126/129	576.5	544.4	490	22	90/91
6	-	324.3	306.3	275.6	28/27	111/115	648.5	612.5	551.3	20/19	80/81
7	-	360.3	340.3	306.3	25/24	100/102	720.6	680.6	612.5	18/17	70/72
8	-	432.4	408.3	367.5	14/13	56/58	864.7	816.7	735	10	40
9	-	480.4	453.7	408.3	11	45	960.7	907.4	816.6	7.9/8	32
10	-	540.4	510.4	459.4	7.9/8	32	1080.9	1020.8	918.8	5.6/5	22/23
11	-	600.4	567.1	510.4	6.3/6	25	1201	1134.2	1020.8	4.5/4	18

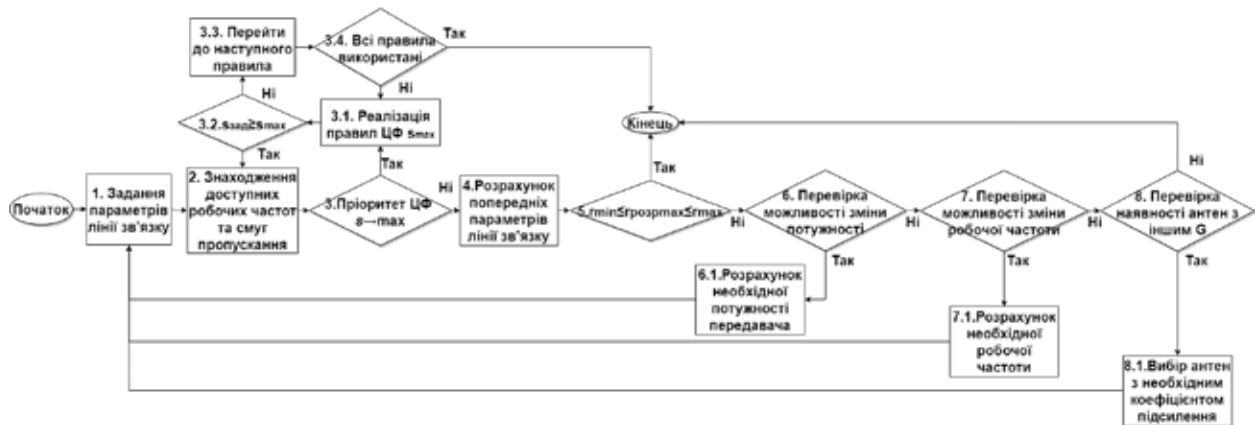


Рис. 6. Алгоритм передачі даних з використанням сенсорів спрямованої дії

3.2. Якщо умова $s_{зад} \geq s_{max}$ досягнута, то повернутися до пункту 2. В іншому випадку перейти до пункту 4.3.

3.3. Реалізувати наступне правило і виконати перевірку на доступність інших правил (пункт 3.4).

3.4. Якщо правил більше не лишилося, то завершити алгоритм із вказанням неможливості досягнення заданої пропускної здатності.

4. Розрахунок максимальної довжини лінії зв'язку $r_{розрmax}$ при заданій пропускній здатності $s_{зад}$ із вказанням робочої частоти, смуги пропускання.

5. Перевірка $r_{min} \leq r_{розрmax} \leq r_{max}$. Якщо умова досягнута, то завершити алгоритм із вказанням параметрів каналу зв'язку. В іншому випадку перейти до пункту 6.

6. Перевірка можливості зміни потужності $P_{прд}$. Якщо так, то перейти до пункту 6.1, інакше – до пункту 7.

6.1. Розрахунок необхідної потужності для досягнення умови в пункті 5 (при заданих обмеженнях).

7. Перевірка можливості зміни робочої частоти. Якщо так, то перейти до пункту 7.1, інакше – до пункту 8.

7.1. Розрахунок необхідної частоти для досягнення умови в пункті 5 (при заданих обмеженнях).

8. Перевірка наявності антен з іншим коефіцієнтом підсилення G . Якщо так, то перейти до пункту 7.1, інакше завершити алгоритм із вказанням неможливості досягнення діапазону довжини лінії зв'язку.

8.1. Вибір антен з необхідним коефіцієнтом підсилення для досягнення умови в пункті 5.

Корегування параметрів лінії зв'язку є багатокритеріальною задачею і у вихідних даних може

бути надано пріоритет визначеним параметрам і певні допустимі поступки (відхилення) для інших. У випадку вищого пріоритету функції максимальної пропускної здатності у пункті 3 алгоритм обирає із допустимих варіантів найкращий із допустимим відхиленням у потужності передавача $P_{прд}$, відстані r , смуги пропускання та робочій частоті. При необхідності досягнення необхідної довжини лінії зв'язку (пункт 5) із заданою пропускною здатністю $s_{зад}$ допустимі поступки у потужності передавача, робочій частоті та коефіцієнтах підсилення антен.

Висновки. В статті викладено два підходи до розрахунку параметрів лінії зв'язку (зокрема максимальної довжини лінії зв'язку) ТА-вузол: теоретичний спосіб та за допомогою моделювання у програмному комплексі Atoll.

Виконані розрахунки та моделювання для трьох можливих значень потужностей 15, 25 та 30 dBm при використанні частот із діапазонів 2.4 та 5 ГГц. Було проведено два блоки порівнянь: із використанням спрямованої антени ($G = 17$ dB) для БПЛА із спрямованою ($G = 17$ dB) та всеспрямованою ($G = 5$ dB) антенами вузла відповідно; із використанням всеспрямованої антени БПЛА ($G = 6$ dB) та вузькоспрямованої антени ($G = 40$ dB) вузла.

Отримані результати теоретичного розрахунку підтверджуються розрахунком за допомогою Atoll (з урахуванням допустимого відхилення). Виходячи з них побудовано сімейство графіків та таблиць. Порівнюючи сімейство графіків залежності швидкості від мінімальної чутливості передавача (зростаючий характер) та залежності відстані від мінімальної чутливості передавача (спадний характер) можна зробити висновок, що максимальна швидкість передачі даних зменшується зі збільшенням довжини каналу зв'язку.

З отриманих результатів першого блоку порівнянь можна зробити висновок, що максимальна відстань лінії зв'язку між вузлом (при використанні всеспрямованої ($G = 5$ dB) та спрямованої антен ($G = 17$ dB) та БПЛА 1-го рівня (або між БПЛА 1-го та 2-го рівнів) відрізняється у 3,9–4,6 разів. Тобто з використанням сенсорів спрямованої дії при умові однакових інших умов можна досягти збільшення висоти розташування (або відстані до вузла) телекомунікаційних аероплатформ. Також варто звернути увагу на те, що максимальна довжина лінії зв'язку обмежується пропускну здатністю каналу зв'язку. Тому другий блок порівнянь показує, що при використанні вузькоспрямованої антени ($G = 40$ dB) можливо

збільшити пропускну здатність у 1,7–3,5 рази при зміні частоти з 5200 на 2447 МГц (або зменшити витрати енергії при зменшенні потужності передавача з 30 до 15 dBm та пропускну здатності у 5–6 разів) при умові розташування БПЛА 1-го рівня на висоті від пів кілометра до одиниць кілометрів.

Запропонований алгоритм реалізації методу передачі даних із використанням сенсорів спрямованої дії. Наукова новизна якого полягає у вдосконаленні функціонування НПМ за допомогою сенсорів спрямованої дії, що дозволяють більш ефективно розподіляти випромінювану енергію із метою максимізації пропускну здатності (або мінімізації затрачуваних енергоресурсів).

Список літератури:

1. Zhijun Zhang. Antenna design for mobile devices / Zhijun Zhang. – Tsinghua University, China: John Wiley & Sons (Asia) Pte Ltd, 2011. – 289 с.
2. Zhi Ning Chen. Antennas for portable devices / Zhi Ning Chen. – Institute for Infocomm Research, Singapore: John Wiley & Sons, Ltd, 2007. – 307 с.
3. Ramos, A.; Varum, T.; Matos, J.N. Compact Multilayer Yagi-Uda Based Antenna for IoT/5G Sensors. *Sensors* 2018, 18, 2914. <https://doi.org/10.3390/s18092914>.
4. Suraj Verma, Prashant Pillai, Yim Hu, Performance Evaluation of Alternative Network Architectures for Sensor-Satellite Integrated Networks, Proceedings – 27th International Conference on Advanced Information Networking and Applications Workshops, WAINA 2013, 10.1109/WAINA.2013.56
5. S. K. Jain and S. S. Pawar, "Characterization of log periodic planar dipole array antenna," 2016 11th International Conference on Industrial and Information Systems (ICIIS), Roorkee, India, 2016, pp. 43-48, doi: 10.1109/ICIINFS.2016.8262905.
6. A. Vasylenko, M. Fernández-Bolaños, S. Brebels, W. de Raedt and G. A. E. Vandenbosch, "Conformal phased array for a miniature wireless sensor node," 2010 Conference Proceedings ICECom, 20th International Conference on Applied Electromagnetics and Communications, Dubrovnik, Croatia, 2010, pp. 1-4.
7. Maxworth. A. Far-Field Radiation Characteristics of Folded Monopole Antennas over a Conducting Ground Plane. *Eng* 2022, 3, 142–160. <https://doi.org/10.3390/eng30100128>.
8. M. G. Tampouratzis, D. Vouyioukas and D. I. Stratakis, "Discone Rectenna Implementation for Broadband RF Energy Harvesting," 2019 8th International Conference on Modern Circuits and Systems Technologies (MOCASST), Thessaloniki, Greece, 2019, pp. 1-4, doi: 10.1109/MOCASST.2019.8741639.
9. G. Q. Luo, Z. F. Hu, L. X. Dong and L. L. Sun, "Planar Slot Antenna Backed by Substrate Integrated Waveguide Cavity," in *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, vol. 7, pp. 236-239, 2008, doi: 10.1109/LAWP.2008.923023.
10. Wi-Fi 6 802.11ax Receiver Input Sensitivity Testing. Режим доступу: <https://www.rfwireless-world.com/test-and-measurement/Receiver-input-sensitivity-testing-for-IEEE-802-11ax-device.html>
11. Wi-Fi 6 Technology and Evolution White Paper, 2020 ZTE Corporation. Режим доступу: https://www.zte.com.cn/content/dam/zte-site/res-www-zte-com-cn/mediares/zte/files/pdf/white_book/Wi-Fi_6_Technology_and_Evolution_White_Paper-202009232125.pdf
12. Лінії радіозв'язку та антенні пристрої. Навчальний посібник / [М.Д. Ільїнов, Т.Г. Гурський, І.В. Борисов, К.М. Гриценко]. – К.: BITI, 2018. – 268 с.

Sushyn I.O., Lysenko O.I. UNIVERSAL METHOD OF DATA TRANSMISSION USING DIRECTED ACTION SENSORS

Sensor nodes are integral components of wireless sensor networks, which are equipped with variable or permanent antennas. The use of efficient antennas and their improvement is a topical issue in the industry. Therefore, the article analyzed and compared modern antennas for mobile devices of directional and omnidirectional action, with the help of which it is possible to organize the connectivity of nodes of mobile wireless sensor networks with telecommunication aerial platforms (TA) based on UAVs of helicopter and aircraft types. The correct choice of antennas for MWSN nodes is an important factor for achieving the required

network parameters: operation time, the minimum number of required UAVs, bandwidth, etc. Omnidirectional antennas are used in most mobile devices (as well as sensor nodes), which is not always a solution that satisfies all requirements, so there is a need for efficient use of the energy resource of nodes using directional antennas. This creates a scientific problem, which consists in the development of data transfer techniques using directional action sensors, taking into account the possibility of application in multi-level ground-air networks (GAN). The theoretical calculation of the length of the TA-node communication line was performed. The obtained results are confirmed by modeling in the Atoll software complex. With the help of the above two approaches, the bandwidth of the communication line was compared with different input parameters of the network and the distance of the communication line using omnidirectional, directional, and narrowly directional antennas. Based on the obtained dependencies, an algorithm for the implementation of the data transmission method using directional action sensors was created. This will make it possible to use it in the creation of advanced long-range GANs with increased bandwidth.

Key words: *MWSN, telecommunication aerial platform, sensor nodes, directional antennas, UAV.*

ІНФОРМАТИКА, ОБЧИСЛЮВАЛЬНА ТЕХНІКА ТА АВТОМАТИЗАЦІЯ

УДК 62-533.66

DOI <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2024.2/03>

Батюк С.Г.

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

Васянович В.М.

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

Ворошилов А.І.

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

СТРУКТУРНЕ ІМІТАЦІЙНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ТЕПЛОЕНЕРГЕТИЧНИХ ІНФОРМАЦІЙНО-ВИМІРЮВАЛЬНИХ СИСТЕМ І СИСТЕМ ПРОГРАМНО-ЛОГІЧНОГО УПРАВЛІННЯ

Імітаційне моделювання динамічних систем є ефективним інструментом налагодження і модернізації промислових систем автоматичного регулювання (САР), які реалізують неперервне регулювання режимних параметрів технологічних процесів і агрегатів з використанням ПІД-регуляторів (та інших регуляторів). Розроблений на кафедрі автоматизації енергетичних процесів (АЕП) НТУУ КПІ полігон імітаційного моделювання дає можливість реалізувати функціональне імітаційне моделювання (моделювання функцій і перехідних процесів замкнених САР) і структурне імітаційне моделювання (взаємодію контролерної і супервізорної функціональностей, реалізованих реальними ПЛК і HMI/SCADA-системами, з технологічним процесом, змодельованим в системі комп'ютерної математики) САР режимних параметрів технологічних (теплоенергетичних) процесів і агрегатів (печі, котли, інженерні системи життєзабезпечення будівель тощо).

Інформаційно-вимірювальні системи (ІВС) в складі САР містять вимірювальні канали (сенсори, нормуючі перетворювачі, вторинні вимірювальні прилади) режимних параметрів технологічних (теплоенергетичних) процесів і агрегатів.

Системи програмно-логічного управління (СПЛУ) в складі систем автоматизації реалізують програмно-логічне управління (технологічна сигналізація; аварійна сигналізація; блокування механізмів і агрегатів; старт-стопне управління рольгангами, конвеєрами, освітленням, підігріванням тощо; програмне і календарне управління механізмами) технологічними (теплоенергетичними) процесами і агрегатами.

В статті викладені результати виконаних на кафедрі АЕП досліджень з імітаційного структурного моделювання теплоенергетичних ІВС і СПЛУ. Показано, що структурне імітаційне моделювання СПЛУ ефективно так само, як і моделювання САР. Зроблено висновок, що ідеологія та інструментарій структурного імітаційного моделювання поширюються на всю функціональність систем автоматизації – як на неперервне регулювання (САР), так і на технологічні вимірювання (ІВС) і програмно-логічне управління (СПЛУ).

Ключові слова: автоматизована система управління, система автоматичного регулювання, інформаційно-вимірювальна система, система програмно-логічного управління, автоматизація технологічних процесів, програмно-технічні засоби автоматизації, імітаційне моделювання, теплоенергетичні вимірювання, контролерна функціональність, супервізорна функціональність.

Постановка проблеми. Імітаційне моделювання динамічних систем є ефективним інструментом налагодження і модернізації промислових систем автоматичного регулювання (САР). Розроблений на кафедрі автоматизації енергетичних процесів (АЕП) НТУУ КПІ полігон імітаційного моделювання дає можливість реалізувати функціональне імітаційне моделювання (моделювання функцій і перехідних процесів замкнених САР) і структурне імітаційне моделювання (взаємодію контролерної і супервізорної функціональностей, реалізованих реальними ПЛК і HMI/SCADA-системами, з технологічним процесом, змодельованим в системі комп'ютерної математики) теплоенергетичних САР. Теплоенергетичні САР – це САР режимних параметрів теплоенергетичних технологічних процесів і агрегатів (печі, котли, інженерні системи життєзабезпечення будівель тощо). Імітаційне моделювання – це програмне (не фізичне і не математичне) моделювання (імітація) фізичних (реальних) активів. Ефективність імітаційного моделювання визначається можливістю реалізувати налагодження і випробування промислової САР в робочих умовах ще до інсталяції розробленої системи автоматизації на майданчику замовника; тобто, фактично, на стадії робочого проектування перед впровадженням і потім на стадії модернізації перед тиражуванням. Таку можливість випробування розробленої системи автоматизації в робочих умовах дає моделювання реального технологічного процесу в системі комп'ютерної математики і використання змодельованого технологічного процесу замість реального фізичного технологічного процесу. Розробник системи автоматизації може перевірити і налагодити контролерну і супервізону функціональності системи автоматизації ще до інсталяції її на майданчику замовника – на розробленій комп'ютерній моделі технологічного процесу. Реалізація такого структурного моделювання потребує вирішення певних програмно-технічних задач (обмін даними Модель – ПЛК – HMI/SCADA-система) і певних задач в моделюванні технологічного процесу в системі комп'ютерної математики (правильна апроксимація динаміки технологічних процесів).

САР режимними параметрами реалізують неперервне регулювання (стабілізацію режимних параметрів на заданих значеннях – уставках) з використанням ПІД-регуляторів (та інших регуляторів).

В складі САР є інформаційно-вимірювальні системи (ІВС), до складу яких входять вимірю-

вальні канали (сенсори, нормуючі перетворювачі, вторинні вимірювальні прилади) режимних параметрів, і регулювально-виконавчі системи (РВС), до складу яких входять регулювально-виконавчі канали (блоки ручного управління, пускачі, виконавчі механізми, регулюючв органи).

Крім неперервного регулювання, системи автоматизації реалізують також програмно-логічне управління (технологічна сигналізація; аварійна сигналізація; блокування механізмів і агрегатів; старт-стопне управління рольгангами, конвеєрами, освітленням, підігріванням тощо; програмне і календарне управління механізмами). Такі системи називаються системами програмно-логічного управління (СПЛУ).

В статті викладені результати виконаних на кафедрі АЕП досліджень з імітаційного структурного моделювання теплоенергетичних ІВС і СПЛУ.

Термінологія і аббревіатури в тексті статті. Технологічний об'єкт управління (ТОУ) – технологічний агрегат (піч, котел, інженерна система тощо), який автоматизується. Автоматизований технологічний комплекс (АТК) – ТОУ, керований АСУ. ТОУ – комплекс ОУ (каналів передачі дії «зміна регулювальної дії – зміна регульованого параметру»). АСУ – комплекс автоматичних систем регулювання (АСР). АТК – комплекс САР режимних параметрів. АТК – кібер-фізична система (КФС). Теплоенергетична САР – САР теплоенергетичного ОУ. Теплоенергетичні ОУ в складі теплоенергетичного ТОУ – це «повільні» і «дуже повільні» ОУ (аперіодичні ланки високого порядку; бак з рідиною – інтегральна ланка). Сучасні автоматизовані системи управління технологічними процесами (АСУТП; надалі просто АСУ) ТОУ є дворівневими. Програмно-технічною платформою контролерного (нижнього) рівня АСУ є програмовані логічні контролери (ПЛК). Бізнес-логіка (неперервне регулювання і програмно-логічне управління) в ПЛК реалізується функціональними блоками (ФБ). Програмно-технічною платформою супервізорного (верхнього) рівня АСУ є HMI/SCADA-системи (надалі системи ЛМІ – людинно-машинного інтерфейсу). Візуалізація в ЛМІ реалізується графічними вікнами з вставленими і анімованими графічними елементами і контролами (меню, мнемосхеми, аларми, тренди, рецепти, розклади, звіти тощо). Сучасна АСУ функціонально структурується на дві підсистеми: інформаційно-вимірювальну систему (ІВС) і регулювально-виконавчу систему (РВС). ІВС – сукупність вимірювальних

каналів (ВК) технологічних параметрів (сенсори або давачі Д; реєструючі прилади РП; вхідні модулі – аналогово-цифрові перетворювачі АЦП і дискретно-цифрові перетворювач ДЦП в ПЛК). РВС – сукупність регулювально-виконавчих каналів (РВК) технологічних параметрів (ФБ в ПЛК; вихідні модулі – цифро-аналогові перетворювачі ЦАП і цифро-дискретні перетворювачі ЦДП в ПЛК; актуатори або виконавчі механізми ВМ; блоки ручного управління БРУ для вибору режимів автоматичного (від ПЛК) або ручного і дистанційного управління з пульта оператора ВМ в ручному режимі; регулюючі органи РО). Програмно-технічні засоби (ПТЗ) АСР – сукупність ВК і РВК в складі АСР (коректно буде також сказати – в складі САР). ФНЧ – фільтр нижніх частот. ФВЧ – фільтр верхніх частот. ФСЧ – фільтр смуги частот. СКМ – система комп’ютерної математики.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Як зазначено і продемонстровано в [1], моделювання промислової логістики, задач програмно-логічного управління та інформаційних функцій АСУ є надзвичайно важливою задачею промислової автоматизації і ефективно здійснюється спеціалізованими програмними засобами (наприклад, в системі моделювання Simio).

Актуальною задачею є перевірка ефективності структурного імітаційного моделювання теплоенергетичних ІВС і СПЛУ. Основною проблемою є питання моделювання логіки роботи специфічних програмно-технічних компонентів реальних фізичних технологічних ліній і агрегатів в системі комп’ютерної математики. Якщо структурне імітаційне моделювання СПЛУ ефективне так саме, як і моделювання САР, це означає, що ідеологія структурного імітаційного моделювання поширюється на всю функціональність систем автоматизації – як на неперервне регулювання, так і на програмно-логічне управління.

Підвищення ефективності ІВС САР теплоенергетичних ОУ є актуальною задачею промислової автоматизації. Особливо актуальним є аналіз можливостей практичного застосування алгоритмів зовнішньої і внутрішньої фільтрації в ІВС САР теплоенергетичних ОУ.

Підвищення ефективності систем програмно-логічного управління (СПЛУ) є актуальною задачею промислової автоматизації. Особливо актуальним є аналіз можливостей практичного застосування структурного імітаційного моделювання для тестування і модифікації типових СПЛУ.

Теплоенергетичні інформаційно-вимірювальні системи

Вимірювання технологічних параметрів в автоматизації технологічних процесів має дві мети: 1) використання в САР режимних параметрі ТОУ, тобто в замкненому контурі регулювання; 2) інформування оператора про стан ТОУ. Відповідно, інформаційні функції АСУ – це не тільки просте фізичне вимірювання технологічних параметрів сенсорами, але і реалізація надзвичайно важливих функцій первинної обробки вимірюваних сигналів в ПЛК і вторинної обробки вимірюваних даних в ЛМІ.

Первинна обробка в ПЛК сигналів від сенсорів технологічних параметрів реалізує такі функції: 1) фільтрація сигналів і даних (апаратна фільтрація вимірюваних сигналів від технологічних сенсорів і програмна фільтрація даних в ПЛК); 2) апроксимація (кусочно-лінійна апроксимація – лінеаризація нелінійної характеристики вимірювання); 3) обмеження мінімального і максимального значень (нелінійність типу насичення); 4) масштабування – лінійне перетворення діапазону (шкали) вимірювання; 5) сповільнення – обмеження швидкості зміни параметру (нелінійність типу насичення); 6) порівняння (порівняння з уставкою РІВНО, БІЛЬШЕ, МЕНШЕ, ДІАПАЗОН); 7) гістерезис – реалізація зони нечутливості і зони повернення (двопозиційна нелінійність – двопозиційна релейна сигналізація і двопозиційне релейне регулювання); 8) алармування – формування події тривоги (аларму) технологічної (попереджувальної) або аварійної; 9) аналітика – статистичний аналіз (виділення найменшого, найбільшого і середнього значень; розрахунок середньоквадратичного відхилення); 10) інтегрування – лінійне інтегрування параметру (площа під графіком зміни параметру); 11) лічильник – математична інкрементація і декрементація (обрахування дискретних подій до уставки лічильника); 12) таймування – реалізація таймерами часових затримок на величину уставки; 13) генерація аналогових і дискретних даних константних і періодичних; 14) логічні операції NOT (логічне НІ – значення виходу протилежне значенню входу), AND (логічне І – вихід = 1, якщо два входи = 1, OR (логічне АБО – вихід = 1, якщо хоча б один з входів = 1), XOR (логічне виключне ТІЛЬКИ АБО – вихід = 1, якщо тільки один з входів = 1).

Найважливішою функцією первинної обробки вимірюваних сигналів в ПЛК є функція фільтрації сигналів і даних. Теплоенергетичні ТОУ – «повільні» ТОУ, які самі є фільтрами низьких частот. Опти-

мальна фільтрація даних на теплоенергетичних об'єктах в умовах значних промислових перешкод – актуальна технічна задача, що може бути ефективно вирішена. Дослідження ефективності зовнішньої і внутрішньої фільтрації в АСУ і її впливу на якість регулювання в САР і якість візуалізації для оператора – важлива задача моделювання фільтрації і аналізу практичної реалізації алгоритмів фільтрації в ПЛК.

Теплоенергетичні системи програмно-логічного управління

Рівень L1 прийняття рішень (рівень регулювання; рівень контролерної автоматизації) в інтегрованій АСУ масштабу підприємства за стандартом ISA-95 відповідає за реалізацію задач неперервного регулювання і задач програмно-логічного управління. Програмно-технічні засоби автоматизації рівня L1 – ПЛК.

Задачі неперервного регулювання – це задачі стабілізації режимних параметрів ТОУ (підтримання режимних параметрів на заданих значеннях – уставках). Реалізуються ПІД-регуляторами (та іншими неперервними регуляторами) в САР режимних параметрів ТОУ. ПЛК входять до складу АСУ неперервним виробництвом (Continuous Production Control) і порційним виробництвом (Batch Production Control).

Задачі програмно-логічного управління реалізуються СПЛУ. ПЛК входять до складу АСУ дискретним виробництвом (Discrete Production Control). Виділяють такі задачі програмно-логічного управління: 1) технологічні і аварійні захисти; 2) взаємне блокування машин і операцій; 3) старт-стопне управління транспортними операціями (управління конвеєрами, рольгангами тощо); 4) управління переміщенням (motion control); 5) системи доступу і безпеки (гвард-системи).

АСУ неперервним і порційним виробництвом реалізують інформаційні, управляючі і захисні функції. Інформаційні функції – вимірювання технологічних параметрів, первинна обробка сигналів і візуалізація даних. Управляючі функції – стабілізація режимних параметрів. Захисні функції – технологічні і аварійні захисти обладнання і взаємне блокування операцій. Захисні функції реалізуються саме СПЛУ в складі АСУ. СПЛУ є такою ж необхідною і важливою частиною промислових автоматизованих технологічних комплексів (АТК – це ТОУ, керований АСУ), як і САР режимних параметрів.

Рівень L2 прийняття рішень (рівень управління; рівень супервізорної автоматизації) в інте-

грованій АСУ масштабу підприємства за стандартом ISA-95 відповідає за реалізацію задач людинно-машинного інтерфейсу (HMI). Програмно-технічні засоби автоматизації рівня L2 – SCADA-системи. SCADA-системи реалізують супервізорне управління як «неперервними» САР, так і «дискретними» СПЛУ.

Структурне імітаційне моделювання ефективно використовується для тестування і модифікації АСУ неперервним і порційним виробництвом. Перспективним є використання ідеології і засобів структурного імітаційного моделювання для тестування і налагодження СПЛУ на стадії робочого проектування і в процесі модифікації.

Постановка завдання:

1. Розробити полігон структурного імітаційного моделювання теплоенергетичних ІВС. Змоделювати і дослідити зовнішню і внутрішню фільтрації сигналів і даних в теплоенергетичних ІВС.

2. Розробити полігон структурного імітаційного моделювання типових СПЛУ. Змоделювати і дослідити типові СПЛУ. Мета дослідження – з'ясувати можливість ефективного моделювання дискретного ТОУ засобами полігону імітаційного SIL-моделювання (ТОУ моделюється в СКМ; контролерна функціональність реалізується в софтПЛК; супервізорна функціональність реалізується HMI/SCADA-системою).

Виклад основного матеріалу. Розроблені полігони структурного імітаційного моделювання реалізовані на платформі СКМ Matlab Simulink – софтПЛК CoDeSys – HMI/SCADA-система AVEVA Web Studio як структурна частина полігону імітаційного SIL-моделювання промислових АТК [2].

Структурне імітаційне моделювання теплоенергетичних інформаційно-вимірювальних систем

Моделювались і досліджувались алгоритми зовнішньої фільтрації сигналів від сенсорів технологічних параметрів і алгоритми внутрішньої фільтрації даних в теплоенергетичних ІВС.

Похибки вимірювання залежать від перешкод процесу вимірювання. Похибку вимірювання класифікують за 1) джерелом походження перешкоди вимірювання і 2) способом походження перешкоди вимірювання.

За джерелом походження перешкоди вирізняють внутрішню (інструментальну) і зовнішню (методичну) похибки вимірювання.

Внутрішня похибка вимірювання – це похибка самих компонентів ВК і залежить від типу і якості компонента (наприклад, давача).

Вона не залежить від величини самого істинного значення, тому вона однакова у всьому діапазоні вимірювання.

Зовнішня похибка вимірювання – це результат впливу на компонент ВК зовнішніх перешкод і способу (методу) монтажу компонента (наприклад, давача). Вона не залежить від величини самого істинного значення, тому вона однакова у всьому діапазоні вимірювання.

За способом походження перешкоди вимірювання иризняють постійну (систематичну) і стохастичну (випадкову) похибки вимірювання.

Постійна похибка вимірювання (ППВ) – це постійне відхилення результату вимірювання від істинного значення вимірюваної величини. Вона не залежить від величини самого істинного значення, тому вона однакова у всьому діапазоні вимірювання.

Стохастична похибка вимірювання (СПВ) – це випадкове відхилення результату вимірювання від істинного значення вимірюваної величини. Вона не залежить від величини самого істинного значення, тому вона однакова у всьому діапазоні вимірювання.

Пригнічення похибки (= пригнічення перешкоди = пригнічення впливу перешкоди) – зменшення похибки до прийнятного рівня, котрий недоцільно зменшувати через зростання складності засобів і алгоритмів пригнічення похибки.

Внутрішня ППВ компонента ВК виникає внаслідок несправності компоненту. Зовнішня ППВ виникає внаслідок неправильного монтажу і неправильної експлуатації компоненту ВК, електростатичного наведення і неправильного заземлення (виникає додаткова різниця потенціалів, тобто напруга). Сумарну внутрішню і зовнішню ППВ об'єднують в єдину ППВ.

Пригнічення ППВ полягає в усуненні джерела виникнення ППВ, тобто в ремонті компоненту ВК, правильному монтажі і правильній експлуатації компоненту ВК, ліквідації електростатичного наведення і правильного заземлення.

Внутрішня СПВ компоненту ВК виникає внаслідок стохастичних похибок внутрішніх елементів приладу (механічних, електричних і електронних схем приладу). Розподілення значень вимірювання підкоряється, так як їх є дуже багато, нормальному закону розподілення Гауса. Кожний компонент ВК має внутрішню СПВ, яка характеризується класом точності компонента. Внутрішня СПВ компоненту ВК принципово ніяк не може бути пригнічена, вона може бути тільки врахована (знаючи паспортний клас точності при-

ладу) при виборі приладу і метрологічному розрахунку всього ВК.

Зовнішня СПВ – це результат впливу на компонент ВК зовнішніх стохастичних перешкод внаслідок, в основному, електромагнітного наведення від силових кабелів і потужного електротехнічного обладнання (яке працює під великим струмом; правило «наводить струм, а не напруга; але наводиться напруга, а не струм»).

Зовнішня СПВ ВК пригнічується фільтрацією вхідних (вимірних) сигналів від сенсорів і власне даних в ПЛК. Використовуються фільтри низьких частот (ФНЧ), фільтри високих частот (ФВЧ) і фільтри смуги частот (ФСЧ).

ФНЧ пропускає з входу на вихід сигнали низьких частот, а пригнічує сигнали високих частот. Пригнічення високих частот полягає в зменшенні амплітуди вихідного сигналу, а частота вихідного сигналу зберігається. Приклади ФНЧ 1-го і 2-го порядків – аперіодичні ланки 1-го і 2-го порядків.

ФВЧ пропускає з входу на вихід сигнали високих частот, а пригнічує сигнали низьких частот. Пригнічення низьких частот полягає в зменшенні амплітуди вихідного сигналу, а частота вихідного сигналу зберігається. Приклади ФВЧ 1-го і 2-го порядків – ланки реального диференціювання 1-го і 2-го порядків.

ФСЧ пропускає з входу на вихід сигнали смуги частот f_1 і f_2 , а пригнічує сигнали нижчих за f_1 частот і вищих за f_2 частот. Пригнічення низьких і високих частот полягає в зменшенні амплітуди вихідного сигналу, а частота вихідного сигналу зберігається. ФСЧ є послідовним з'єднанням: або ФНЧ (фільтрація нижчих за f_2 частот) і ФВЧ (фільтрація вищих за f_1 частот); або ФВЧ (фільтрація вищих за f_1 частот) і ФНЧ (фільтрація нижчих за f_2 частот).

Зовнішня фільтрація – екранування компонентів ВК і ПЛК від електромагнітних наведень шляхом; здійснюється встановлення програмно-технічних засобів в спеціалізовані металеві шафи з їх заземленням, прокладання сигнальних кабелів окремо від силових кабелів, використання скручених пар, заземлення екранів кабелів.

Внутрішня фільтрація – програмна фільтрація в ПЛК; здійснюється або ФБ (графічна технологічна мова ПЛК), або різницевиими рівняннями (текстова технологічна мова ПЛК).

Задача зовнішньої фільтрації сигналів до ПЛК – пригнітити високочастотну і низькочастотну зовнішні перешкоди (результат електромагнітного наведення шкідливих перешкод на корисний сигнал). Реалізується виключно апаратними фільтрами. Моделюється як ланки ФНЧ і ФВЧ.

Задача внутрішньої фільтрації даних в ПЛК – відфільтрувати корисний низькочастотний сигнал (значення регульованого параметру; корисний сигнал завжди низькочастотний, так як ми маємо справу з «повільними» і «дуже повільними» теплоенергетичними ОУ) і пригнітити шкідливу високочастотну перешкоду.

На рис. 1 представлена функціональна модель фільтрації виміряного сигналу в ПЛК в СКМ Matlab Simulink. Зовнішні і внутрішні фільтри моделювались як ланки ФНЧ і ФВЧ.

Зовнішня і внутрішня низькочастотна фільтрація практично не мають ніякого сенсу для САР з замкненим контуром регулювання. Зовнішній ФНЧ не має практичного сенсу тому, що: пригнічена високочастотна перешкода не є небезпечною для ОУ, який сам є ФНЧ і сам фактично майже не реагує (не встигає реагувати) на високочастотну перешкоду; непригнічена низькочастотна перешкода накладається на корисний високочастотний сигнал виміряного регульованого параметру і спотворює ефект регулювання, «змушуючи» регулятор хибно реагувати на низькочастотну перешкоду як на корисний сигнал і хибно стабілізувати параметр на «неправильних» значеннях. Внутрішній ФНЧ в замкненому контурі є шкідливим для САР, так як, за рахунок включення в контур регулювання додаткових аперіодичних ланок ФНЧ, штучно погіршується динаміка ОУ (сам ОУ є аперіодичною ланкою; включення низькочастотного фільтру в контур регулювання означає послідовне включення додаткових аперіодичних ланок послідовно з аперіодичною ланкою ОУ); використання ФНЧ в замкненому контурі регулювання САР означає, фактично, зміну передатної функції ОУ (це еквівалентно дрейфу характеристик ОУ).

Зовнішня і внутрішня низькочастотна фільтрація (ФНЧ) є ефективною саме для інформаційних задач (систем), де немає замкнених контурів регулювання. Ефективна зовнішня фільтрація реалізується ефективним екрануванням. Ефективна внутрішня фільтрація реалізується програмно розробленими ФНЧ; переважно достатньо аперіодичної ланки 1-го порядку, інколи 2-го порядку. Для промислових інформаційних систем високочастотна і смугова фільтрації (ФВЧ і ФСЧ) не мають сенсу; високочастотна фільтрація (ФВЧ) зрідка має сенс тільки для швидкісних технологічних процесів, наприклад, для зварювання (необхідно відфільтрувати корисні високочастотні сигнали і пригнітити низькочастотну перешкоду, як правило, за живленням, тобто частотою змінного струму 50 Гц). В загальному випадку, найбільш шкідливими для інформаційних систем є саме відносно низькочастотні перешкоди частотою 50 Гц, продуковані електромагнітним наведенням. Задача зовнішньої і внутрішньої фільтрації для інформаційних систем – пригнітити перешкоду 50 Гц і відфільтрувати (пропустити на вихід) корисний низькочастотний сигнал (частотою, меншою за 50 Гц).

Так як АСУ є як автоматичною, так і інформаційною системою (включає в себе як ІВС в складі САР, так і автономні ІВС), то зовнішня і внутрішня низькочастотна фільтрація є необхідною для АСУ (саме для автономних ІВС, які є невід’ємною частиною АСУ; автономні інформаційні функції є такі ж важливі, як і функції регулювання).

Структурне імітаційне моделювання теплоенергетичних систем програмно-логічного управління

Моделювались і досліджувались наступні СПЛУ: СПЛУ ліфтовою системою; СПЛУ системою замовлень; СПЛУ насосною групою; СПЛУ системою перекидання факелу.

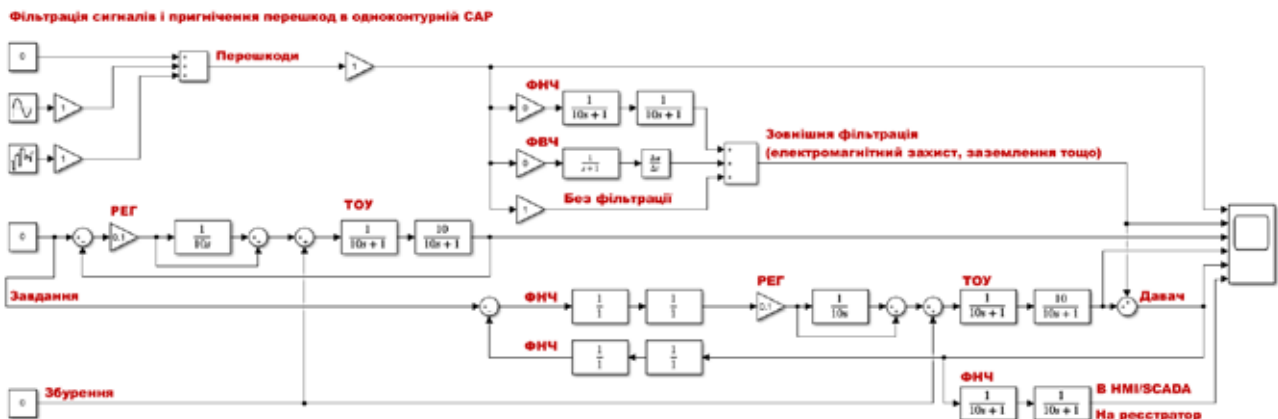


Рис. 1. Моделювання фільтрації в САР режмового параметру в СКМ Matlab Simulink

Ліфтова система (ТОУ) в СПЛУ ліфтовою системою змодельована в СКМ інтегруючими ланками, ланками транспортного запізнення, елементами порівняння і логічними елементами.

Система замовлень (ТОУ) в СПЛУ системою замовлень змодельована в СКМ інтегруючими ланками, ланками транспортного запізнення, елементами порівняння і логічними елементами.

Насосна група (ТОУ) в СПЛУ насосною групою змодельована в СКМ інтегруючими ланками, ланками транспортного запізнення, елементами порівняння і логічними елементами.

Система перекидання факелу є необхідним технологічним компонентом промислових регенеративних камерних печей. Класичний приклад – скловарна піч. Моделювання СПЛУ системою перекидання факелу передбачає моделювання в СКМ процесів нагрівання та охолодження повітря в регенераторах і переміщень запірних клапанів. Процеси нагрівання і охолодження повітря в регенераторах і переміщення запірних клапанів змодельовані в СКМ інтегруючими ланками, ланками транспортного запізнення, елементами порівняння і логічними елементами.

Подача газу та повітря в скловарній печі з поперечним напрямком полум'я здійснюється по черзі або на праву, або на ліву сторону печі. Для підвищення ефективності процесу варки скла використовуються регенератори. Для нормальної роботи скловарних печей необхідно, щоб в робочу камеру постійно надходило нагріте повітря і газ. З цією метою на печі встановлюють дві пари регенераторів, насадка яких по черзі то нагрівається газами, то передає закумуляоване насадкою тепло повітря. Тривалість подачі повітря або період відведення димових газів 30 хв. Протягом 30 хв через насадки регенераторів проходять димові гази, віддаючи цегляній кладці своє тепло. Через 30 хв в нагріті насадки замість димових газів надходить холодне повітря. Закумуляоване насадкою тепло передається повітря, і воно нагрівається до необхідної температури. Поступово, в процесі віддачі тепла, насадка охолоджується і після досягнення певної межі (через 30 хв) процес повторюється. Через регенератор знову пропускаються димові гази, насадка акумулює тепло, потім передає його повітря і т. д. Димові гази надходять в регенератори з температурою 1350–1500 °С і йдуть з них з температурою 300–500 °С.

Формування команди на перекидання факелу виконується автоматично за такими ознаками: за максимально допустимим інтервалом часу між перекиданнями факелу зазвичай до 30 хвилин); за

максимально допустимою температурою верхніх частин регенераторів; за мінімально допустимою температурою нижніх частин регенераторів.

Циклограма перекидання факелу наведена на рис. 2 (перекидання зліва направо; для перекидання факелу зправа наліво циклограма аналогічна).

В циклограмі використані наступні позначення: τ_1 – початок перекидання факелу; τ_8 – закінчення перекидання факелу; τ_ϕ – тривалість перекидання факелу (до 60 с); τ_1^u – тривалість переміщення виконавчих механізмів, які закриваються (τ_1^u ; τ_{21}^u) або відкриваються (τ_{22}^u ; τ_3^u), діапазон значень 2–5 с; τ_1^n – тривалість програмно організованих пауз (τ_1^n – на продування топки повітрям; τ_2^n – на заповнення топки повітрям; τ_3^n – на спрацювання всіх кінцевих вимикачів і давачів реле тиску), діапазон значень 5–10 с.

Дослідження змодельованих СПЛУ здійснювалось нанесенням старт-стопних команд, які запускали або зупиняли роботу СПЛУ.

Результати і висновки. Дослідження змодельованих типових ІВС щодо зовнішньої фільтрації сигналів і внутрішньої фільтрації даних дає можливість сформулювати наступні результати і висновки (рекомендації):

1. Зовнішня низькочастотна фільтрація (апаратно реалізоване екранування від електромагнітних наведень) перешкод (апаратні ФНЧ) в САР є неефективною, так як вона пропускає на вхід регулятора низькочастотну перешкоду, яку регулятор не може «відрізнити» від низькочастотного вимірюваного регульованого параметру, сприймає як зміну регульованого параметру і відповідно реалізує регулювальну дію, яка, в даному випадку, є зайвою і помилковою. Екранування (тобто апаратний ФВЧ) має сенс виключно як засіб запобігання електромагнітних уражень апаратури САР;

2. Зовнішня фільтрація, взагалі-то, має бути високочастотною (апаратні ФВЧ) – фільтрувати нешкідливу для САР високочастотну перешкоду (пропускати її на вихід без зменшення амплітуди) і пригнічувати шкідливу для САР низькочастотну перешкоду (пропускати на вихід зі зменшеною в багато разів амплітудою). Але апаратна високочастотна фільтрація не може бути реалізована, так як апаратний ФВЧ принципово не може бути реалізований технічно, бо має мати в своєму складі ланку реального диференціювання, що принципово не можливо реалізувати апаратно;

3. Використання внутрішнього ФНЧ в ПЛК (програмно реалізованого ФНЧ в ПЛК) в замкненому контурі регулювання є неефективним, так як

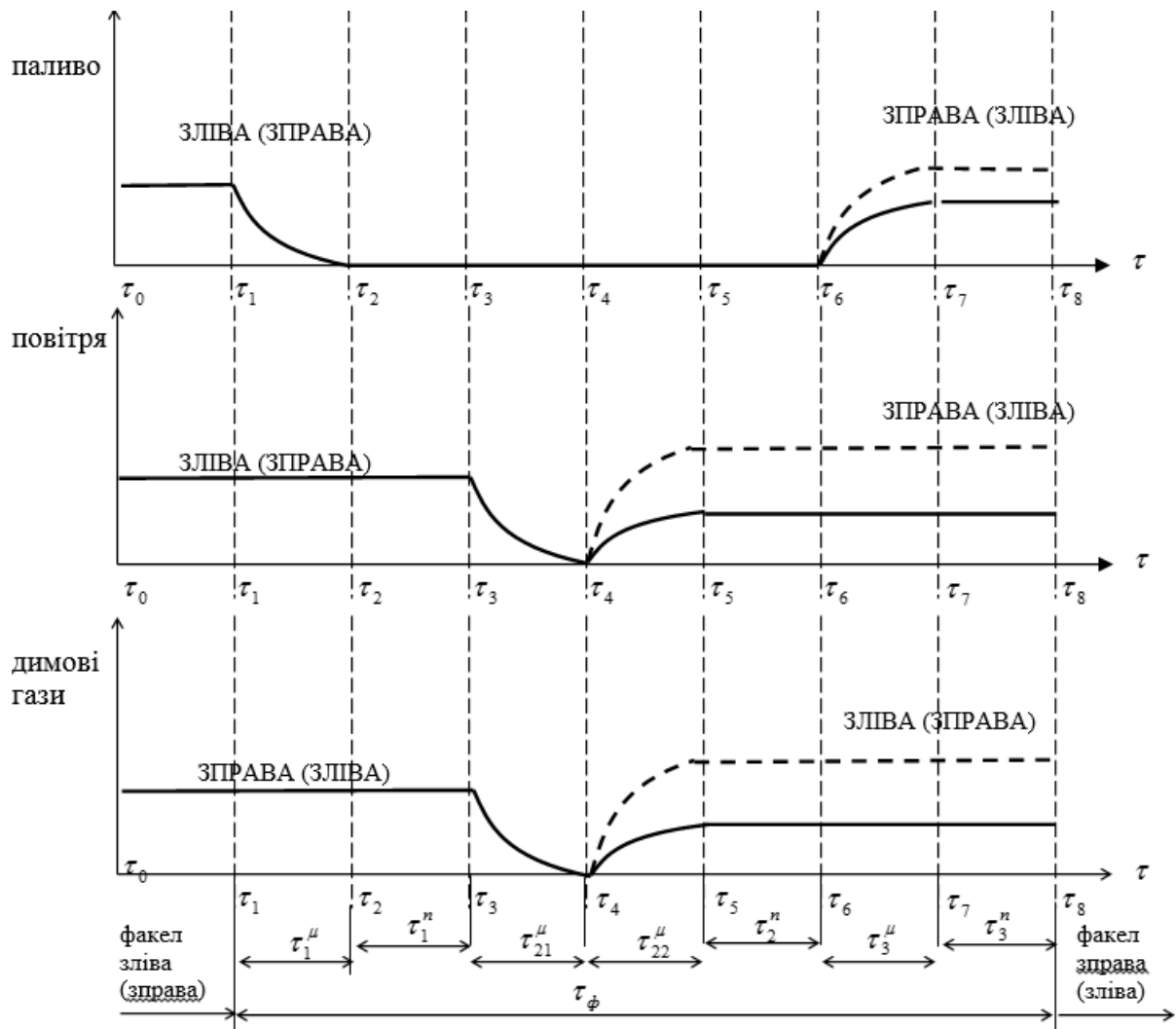


Рис. 2. Циклограма перекидання факелу в топці печі

фактично вносить додаткову інерційність в контур регулювання (додаткову аперіодичну ланку першого або високого порядку). Так як ОУ сам є ФНЧ, то високочастотні перешкоди практично не впливають на якість регулювання в САР;

4. Використання внутрішнього ФНЧ в ПЛК є ефективним для фільтрації сигналу, який передається для візуалізації на реєструючий прилад або в HMI/SCADA-систему;

5. Внутрішній програмний ФВЧ в ПЛК не потрібен принципово, бо не має сенсу пригнічувати шкідливу низькочастотну перешкоду (яку неможливо пригнітити зовнішнім апаратним ФВЧ, який технічно неможливо реалізувати), бо в низькочастотному сигналі завжди є корисний низькочастотний вимірний регульований параметр (який принципово не можна пригнічувати, бо саме це вимірювання і реалізує принцип регулювання за відхиленням в замкненому контурі, тобто принцип зворотного зв'язку). Крім того,

взагалі-то, програмний ФВЧ неможливо реалізувати, бо він має мати в своєму складі ланку реального диференціювання, що практично неможливо ефективно реалізувати програмно (як і апаратно).

Дослідження змодельованих типових СПЛЮ дає можливість сформулювати наступні результати і висновки (рекомендації):

1. Полігон структурного імітаційного SIM-модельовання так само ефективно може бути використаний для тестування СПЛЮ, як і для САР режимних параметрів. Дискретні ТОУ, так само як і неперервні ТОУ, ефективно моделюються в СКМ. Для моделювання динамічних елементів в дискретних ТОУ достатньо використовувати інтегруючі ланки і ланки транспортного запізнення. Аперіодичні ланки, практично, не використовуються (немає перехідної динаміки). Контролерна функціональність реалізується в софтПЛК. Супервізорна функціональність реалізується HMI/SCADA-системою;

2. Ефективність структурного імітаційного SIL-моделювання СПЛУ продемонстрована для типових СПЛУ: СПЛУ ліфтовою системою; СПЛУ системою замовлень; СПЛУ насосною групою; СПЛУ системою перекидання факелу;
3. Перспективним є використання полігону структурного імітаційного SIL-моделювання для тестування СПЛУ технологічними і аварійними захистами на теплових і атомних електричних станціях.

Список літератури:

1. Joines, J.A., S.D. Roberts. Simulation Modeling with Simio: A Workbook. 2nd ed. Pittsburgh: Simio LLC. 2012.
2. Батюк С.Г. Імітаційне моделювання і цифровий твінінг енергетичних кібер-фізичних систем (кібер-енергетичних систем) // Досягнення України та країн ЄС у сфері інновацій і винахідництва в галузі техніки : колективна монографія. С. 44-109. Рига, Латвія : Izdevniecība "Baltija Publishing", 2022. 544 с. 65 с.

Batiuk S.G., Vasianovych V.M., Voroshylov A.I. STRUCTURAL IMITATION MODELING OF THERMAL ENERGY INFORMATION-MEASURING SYSTEMS AND SYSTEMS OF PROGRAM-LOGIC

Imitation modeling of dynamic systems is an effective tool for setting up and modernizing industrial system of automatic control (SAR), which implement continuous control of regime parameters of technological processes and aggregates using PID-controllers (and other controllers). The platform for imitation modeling developed at the Department of Power Process Automation (AEP) of NTUU KPI makes it possible to implement functional imitation modeling (imitation of functions and transient processes of closed-loop SAR) and structural imitation modeling (interaction of controller and supervisor functionalities implemented by real PLCs and HMI/SCADA systems, with the technological process modeled in the system of computer mathematics) SAR of regime parameters of technological (thermal energy) processes and aggregates (stoves, boilers, engineered life support systems of buildings, etc.).

Information-measuring systems (IMS) as part of the SAR contain measurement channels (sensors, normalizing converters, secondary measuring devices) of regime parameters of technological (thermal energy) processes and units.

Systems of program-logic control (SPLC) as part of automation systems implement software-logic control (technological signaling; emergency signaling; locking of mechanisms and units; start-stop control of roller conveyors, conveyors, lighting, heating, etc.; program and calendar control of mechanisms) by technological (thermal energy) processes and aggregates.

The article presents the results of the imitation structural modeling of thermal power IMS and SPLC carried out at the AEP department. It is shown that the structural imitation modeling of SPLC is as effective as the modeling of SAR. It was concluded that the ideology and toolkit of structural imitation modeling extends to the entire functionality of automation systems – both continuous regulation (SAR), technological measurements (IMS) and program-logic control (SPLC).

Key words: *automated control system, system of automatic regulation, information-measuring system, system of program-logic control, automation of technological processes, software-technical means of automation, imitation modeling, thermal energy measurements, controller functionality, supervisory functionality.*

Батюк С.Г.

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

Мар'янський М.О.

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

Салівон Д.В.

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

Федоров Д.Д.

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

ТЕПЛОЕНЕРГЕТИЧНІ СИСТЕМИ АВТОМАТИЧНОГО РЕГУЛЮВАННЯ З СТРУКТУРНИМИ РЕГУЛЯТОРАМИ І ЦИФРОВИМИ ДВІЙНИКАМИ

Підвищення ефективності систем автоматичного регулювання (САР) є актуальною задачею промислової автоматизації і реалізується у двох паралельних напрямках: 1) покращення структури і алгоритмів САР; 2) імітаційне моделювання і дослідження структур і алгоритмів САР з метою їх оптимальних конфігурування і параметризації. Метод управління з використанням внутрішньої моделі ОУ є надзвичайно ефективним методом покращення функціонування промислових САР. Реалізація в замкненому контурі регулювання одноконтурної САР моделі прямого каналу ОУ призводить до структуризації класичних ПІД-регуляторів (структурні ПІД-регулятори і ПІД-регулятори змінної структури). Реалізація в розімкнених компенсаційних зв'язках комбінованих САР моделей каналів внутрішніх і зовнішніх збурень ОУ призводить до використання компенсаторів як цифрових двійників ОУ.

На кафедрі автоматизації енергетичних процесів НТУУ КПІ виконані роботи з імітаційного моделювання покращених структур і алгоритмів САР з метою їх дослідження і верифікації. В статті викладені результати досліджень за такими тематичними напрямками: 1) розробка одноконтурних САР з структурними ПІД-регуляторами; 2) розробка одноконтурних САР з ПІД-регулятором змінної структури; 3) розробка комбінованих САР з цифровими двійниками. Розроблений полігон функціонального імітаційного моделювання теплоенергетичних САР реалізований як альбом моделей в середовищі СКМ Matlab Simulink.

На основі дослідження змодельованих САР щодо сигнальних збурень і аналіз чутливості змодельованих САР відносно параметричних збурень сформульовані наступні висновки і рекомендації: 1) одноконтурні САР з структурними ПІД-регуляторами є роботоздатними і ефективними, легко можуть бути реалізовані стандартними функціональними блоками сучасних ПЛК і рекомендуються до промислового застосування; 2) одноконтурні САР з ПІД-регуляторами змінної структури є роботоздатними і ефективними, легко можуть бути реалізовані стандартними функціональними блоками сучасних ПЛК і рекомендуються до промислового застосування; 3) комбіновані САР з цифровими двійниками є практично нероботоздатними, приципово поступаються ефективністю каскадним САР і не рекомендуються до промислового застосування.

Ключові слова: *теплова енергетика, кібер-фізична система, автоматизована система управління, система автоматичного регулювання, автоматизація технологічних процесів, програмно-технічні засоби автоматизації, імітаційне моделювання, ПІД-регулятор, цифровий двійник, граничний девайс, контролерна функціональність, супервізорна функціональність.*

Постановка проблеми. Підвищення ефективності систем автоматичного регулювання (САР) є актуальною задачею промислової автоматизації і реалізується у двох паралельних напрямках: 1) покращення структури і алгоритмів САР; 2) імітаційне моделювання і дослідження структур і алгоритмів САР з метою їх оптимальних конфігурування і параметризації.

Підвищення ефективності одноконтурних САР теплоенергетичних ОУ є актуальною задачею промислової автоматизації. Особливо актуальним є аналіз можливостей практичного застосування модифікованих ПІД-регуляторів в одноконтурних САР теплоенергетичних ОУ.

Практична реалізація комбінованих САР теплоенергетичних ОУ є актуальною задачею промислової автоматизації. Особливо актуальним є аналіз можливостей практичного застосування цифрових двійників (ЦД) теплоенергетичних ОУ в комбінованих САР.

На кафедрі автоматизації енергетичних процесів (АЕП) НТУУ КПІ виконуються роботи з імітаційного моделювання покращених структур і алгоритмів САР з метою їх дослідження і верифікації. В статті викладені результати досліджень за такими тематичними напрямками: 1) розробка одноконтурних САР з структурними ПІД-регуляторами; 2) розробка одноконтурних САР з ПІД-регулятором змінної структури; 3) розробка комбінованих САР з цифровими двійниками.

Термінологія і аббревіатури в тексті статті. Технологічний об'єкт управління (ТОУ) – технологічний агрегат (піч, котел, інженерна система тощо). Автоматизований технологічний комплекс (АТК) – ТОУ, керований АСУ. ТОУ – комплекс ОУ (каналів передачі дії «зміна регульовальної дії – зміна регульованого параметру»). АСУ – комплекс автоматичних систем регулювання (АСР). АТК – комплекс САР режимних параметрів. АТК – кібер-фізична система (КФС). Теплоенергетична САР – САР теплоенергетичного ОУ. Теплоенергетичні ОУ в складі теплоенергетичного ТОУ – це «повільні» і «дуже повільні» ОУ (аперіодичні ланки високого порядку; бак з рідиною – інтегральна ланка).

Аналіз останніх досліджень і публікацій. ПІД-регулятор є найпоширенішим варіантом в автоматичному неперервному регулюванні і практично домінує в реалізаціях систем стабілізації режимних параметрів промислових ТОУ. Як зазначено і продемонстровано в [1], надзвичайно ефективним методом покращення функціонування промислових САР є метод управління

з використанням внутрішньої моделі ОУ. Реалізація в замкненому контурі регулювання одноконтурної САР моделі прямого каналу ОУ призводить до структуризації класичних ПІД-регуляторів (структурні ПІД-регулятори і ПІД-регулятори змінної структури). Реалізація в розімкнених компенсаційних зв'язках комбінованих САР моделей каналів внутрішніх і зовнішніх збурень ОУ призводить до використання компенсаторів як цифрових двійників ОУ.

Одноконтурні САР з структурними ПІД-регуляторами

Одноконтурна САР режимного параметру реалізує принцип регулювання за відхиленням (принцип зворотного зв'язку) і має один замкнений контур регулювання. Регулятор є одноімпульсним (тобто в САР є тільки один регульований параметр) – на вхід регулятора зі знаком мінус (як зворотний зв'язок) подається поточне значення (імпульс) режимного параметру (завдання подається зі знаком плюс і за імпульс не рахується). ОУ є каналом передачі регульовальної дії «зміна регульовальної дії – зміна регульованого параметру». Регульований параметр завжди вимірюється (а не обчислюється). САР реалізує управляючу функцію стабілізації виміряного регульованого параметру, тобто підтримання виміряного регульованого параметру на заданому значенні (уставці) шляхом зміни регульовальної дії. Використовується класичний ПІД-регулятор, який є оптимальним регулятором для лінійних ОУ. Основний і найпоширеніший тип САР. Фундаментальна, базова і в той же час математично і технічно найпростіша САР. Принципова і видатна особливість одноконтурної САР (тобто принципу регулювання за відхиленням) – зворотний зв'язок від ОУ (вимірний режимний параметр акумулює в собі усі впливи усіх збурень, відомих і невідомих, які можна і які не можна виміряти; регулювання здійснюється завжди і тільки тоді, коли збурення впливають на регульований параметр). Неідеальність одноконтурної САР – принциповий конфлікт між точністю і якістю регулювання в САР (швидкодією регулятора і запасом сталості замкненої САР). Є два шляхи покращення якості регулювання в одноконтурній САР.

Перший шлях. Ускладнювати структуру ПІД-регулятора в одноконтурній САР – перехід до аналітичного конструювання регуляторів (перехід до аналітичних регуляторів ПІД²Д³... тощо; додаткові параметри Д², Д³... тощо обчислюються, а не вимірюються). Основний метод в «сучасній» ТАУ (лінійний аналіз в часовій області – рівняння

в просторі станів). Це неефективно, оскільки призводить до негрубих САР відносно параметричних збурень (дрейфу параметрів ОУ); негрубих саме тому, що додаткові параметри обчислюються, а не вимірюються.

Другий шлях. Ускладнювати структуру САР, не змінюючи ПД-регулятор – перехід до САР з додатковими інформаційними зв'язками (перехід до комбінованих і багатоконтурних – реально двоконтурних – САР). «Додаткові інформаційні» зв'язки: «додаткові» до головного зворотного зв'язку; «інформаційні» тому, що несуть додаткову інформацію, так як додатковий режимний параметр обов'язково вимірюється, а не просто обчислюється. Основний спосіб в «класичній» ТАУ (лінійний аналіз в частотній області – передавальні функції) і в практичній промисловій реалізації. Ефективний, так як призводить до малочутливих САР відносно параметричних збурень (дрейфу параметрів ОУ).

Можливий третій шлях. Залишити одноконтурну структуру САР. Залишити класичний ПД-регулятор, але змінити його структуру шляхом послідовного підключення коригуючих ланок. Структура такого структурного ПД-регулятора не є ускладненою, так як не містить нових похідних (другого і вище порядків).

Одноконтурні САР з ПД-регуляторами змінної структури

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

Нелінійні САР (нелінійні диференціальні або різницеві рівняння; параметри ОУ залежать від амплітуд регулюючої дії, збурень і регульованого параметру і його похідних) промислово нероботоздатні, так як результати розрахунку, моделювання і налагодження не є відтворюваними в практичній реалізації (залежність якості перехідних процесів від амплітуд регулювальної дії і збурень – час перехідних процесів завжди різний, амплітуди коливань перехідних процесів нееквідистантні). Єдиний виняток – одноконтурна САР з двопозиційним релейним регулятором. В такій САР сталим режимом роботи є автоколивання (негармонійні і несинусоїдальні коливання), амплітуда і період яких можуть змінюватись, але ніколи не може бути перехідного процесу, що розходиться. В лінійній одноконтурній САР з ПД-регулятором при неправильних налагодженнях ПД-регулятора може бути перехідний процес, що розходиться. В лінійній САР гармонійні синусоїдальні коливання є ознакою знаходження САР на межі сталості. (це нештатно і погано, тому що така САР є негрубою – вона при параметричних збуреннях може стати як сталою, так і несталою). Якщо лінійна САР є сталою (тобто ще має запас сталості до межі сталості), то перехідний процес сходиться – амплітуди коливань з кожним напівперіодом зменшуються (це штатно і добре). Якщо лінійна САР є несталою, то перехідний процес розходиться – амплітуди коливань з кожним напівперіодом збільшуються (це нештатно і катастрофічно). В авіаційних, воєнних і космічних застосуваннях використовуються виключно нелінійні САР з релейними регуляторами (релейні САР). В промисловості використовуються виключно лінійні САР з ПД-регуляторами. В промисловості релейні САР використовуються тільки тоді, коли АТК має багато САР і дешевше реалізувати релейні САР, ніж лінійні з ПД-регуляторами (економія на сенсорах, актуаторах і кваліфікованих програмістах ПЛК і кваліфікованих налагоджувачах САР).

Окремим різновидом лінійних динамічних систем є системи змінної структури, у яких коефіцієнти при вихідних параметрах лінійного диференціального рівняння залежать від часу (але не залежать від амплітуд регулювальної дії, збурень і регульованого параметру і його похідних).

В нелінійних динамічних системах коефіцієнти при вихідних параметрах лінійного диференціального рівняння залежать від амплітуд регулювальної дії, збурень і регульованого параметру і його похідних (а від часу не залежать; тому таке диференціальне рівняння вже є нелінійним).

Класичним прикладом нелінійного ОУ є ОУ з нелінійним регулюючим органом (РО). РО характеризується витратною характеристикою – залежністю відносної витрати через РО від відносного відкриття РО (відносної площі поперечного перерізу). Інструментальна витратна характеристика РО – це витратна характеристика РО при постійному перепаді тиску на РО; визначається виключно механікою і кінематикою РО; як правило, є лінійною. Робоча витратна характеристика РО – це витратна характеристика РО в реальних умовах експлуатації, тобто при змінному перепаді тиску на РО. Відповідно до рівняння витрати, витрата через РО пропорційна площі поперечного перерізу РО і корню квадратному з перепаду тиску на РО. При постійному перепаді тиску на РО витрата через РО завжди пропорційна площі перерізу, тобто змінюється лінійно (з одним і тим самим коефіцієнтом пропорційності); це і є інструментальна витратна характеристика. В робочих умовах перепад тиску (і, відповідно, корінь квадратний з нього) різний – при повністю відкритому РО він мінімальний, а при повністю закритому РО він максимальний. Відповідно, витрата через РО буде змінюватись нелінійно, тобто з різними коефіцієнтами пропорційності в різних діапазонах положення РО. Робоча витратна характеристика РО є приблизно квадратичною (так як витрата пропорційна корню квадратному з перепаду тиску на РО). Фізично і математично РО входить до складу ОУ, і його коефіцієнт пропорційності входить до складу коефіцієнту пропорційності ОУ. Для інструментальної витратної характеристики РО (тобто для ідеалізованих умов функціонування РО) ми вважаємо, що коефіцієнт пропорційності РО дорівнює одиниці; для робочої витратної характеристики РО (тобто для реальних умов функціонування РО) коефіцієнт пропорційності РО змінний (може бути більше і менше одиниці); а це означає, що, в залежності від положення РО коефіцієнт пропорційності ОУ (в який входить РО) є змінним, тобто такий ОУ стає нелінійним (відповідно, нелінійною стає і вся САР).

ПІД-регулятор лінійної САР з ОУ змінної структури або нелінійним ОУ має мати змінну структуру – параметри регулятора, з метою забезпечення завжди однакової якості регулювання, мають змінюватись в темпі зі зміною параметрів ОУ. Регулятор змінної структури в англомовній технічній літературі називається регулятором з програмним підсиленням (gain-scheduled controller); під коефіцієнтом підсилення розуміється динамічний коефіцієнт підсилення

(тобто вся передатна функція ПІД-регулятора), а не тільки коефіцієнт пропорційності ПІД-регулятора. Термін «змінна структура» для ПІД-регулятора має інший сенс, ніж для ОУ змінної структури. В ОУ змінної структури параметри змінюються тільки в часі. В ПІД-регуляторі змінної структури параметри регулятора можуть змінюватись як в часі (в складі САР з ОУ змінної структури), так і в залежності від положення РО (в складі САР з нелінійним РО, тобто нелінійним ОУ). Таким чином, ПІД-регулятор змінної структури (ПІД-регулятор з програмним підсиленням) може бути використаний як в САР з ОУ змінної структури (і це вже буде САР змінної структури), так і в САР з нелінійним ОУ (і ця САР вже буде, вірніше, залишиться, лінійною САР). Для реалізації САР з ПІД-регулятором змінної структури потрібно кусково-лінійно апроксимувати відповідно динамічну характеристику ОУ змінної структури в часі або нелінійну статичну робочу витратну характеристику РО в залежності від положення РО. На такій кусково-лінійній характеристиці ОУ чи РО виділяються лінійні діапазони, в яких параметри ОУ не змінюються. Відповідно, в межах кожного такого лінійного діапазону ОУ використовуються постійні (в межах діапазону) оптимальні (наперед відомі) параметри ПІД-регулятора.

ПІД-регулятор змінної структури в САР з ОУ змінної структури чи нелінійним ОУ (РО) має фіксувати момент переходу на новий діапазон кусково-лінійної характеристики ОУ і програмно змінювати свої параметри налагодження (які попередньо розраховані, завантажені і зберігаються як дані в пам'яті ПЛК).

Комбіновані САР з цифровими двійниками

Комбінована САР режимного параметру реалізує принцип комбінованого регулювання – комбінація принципу зворотного зв'язку і принципу компенсації збурень. Структурно є одноконтурною САР з додатковою компенсацією вимірних сигнальних збурень. Компенсатори в комбінованій САР використовуються в розімкненому контурі регулювання, тому не створюється додатковий замкнений контур регулювання, тому компенсатори не впливають на сталість замкненої САР. Компенсатори комбінованої САР є типовим (і практично єдиним) прикладом застосування ЦД в реальних промислових САР (в розімкненому контурі).

Постановка завдання:

1. Змодельовати і дослідити одноконтурні САР з структурними ПІД-регуляторами.

2. Змодельовати і дослідити одноконтурну САР з ПІД-регулятором змінної структури.

3. Змодельовати і дослідити комбіновані САР з компенсаторами збурень як цифровими двійниками.

Виклад основного матеріалу. Розроблений полігон функціонального імітаційного моделювання теплоенергетичних САР з структурними регуляторами і цифровими двійниками – альбом моделей в середовищі СКМ Matlab Simulink, реалізований як функціональна частина полігону імітаційного SIL-моделювання промислових АТК [2].

Функціональне імітаційне моделювання одноконтурної САР з структурними ПІД-регуляторами

Моделювались і досліджувались наступні САР: одноконтурна САР з предиктивним ПІД-регулятором; одноконтурна САР з каскадним ПІД-регулятором; одноконтурна САР з квадратичним ПІД-регулятором.

Модель одноконтурної САР з предиктивним ПІД-регулятором наведена на рис. 1. Моделі одноконтурних САР з каскадним і квадратичним ПІД-регуляторами наведені на рис. 2.

Задля наочності і порівняння структур на моделях наведені структури одноконтурної САР з класичним ПІД-регулятором. Використовується модель універсального ОУ з випереджальною та інерційною частинами.

Предиктивний ПІД-регулятор реалізує класичну ідею предиктора Сміта (модель САР з предиктором Сміта також, задля наочності, наведена на рис. 1). Предиктивний ПІД-регулятор реалізо-

ваний як регулятор з еталонною моделлю випереджальної частини універсального ОУ. Каскадний ПІД-регулятор реалізований як регулятор з еталонною моделлю стабілізуючої САР каскадної САР універсального ОУ.

Каскадний ПІД-регулятор реалізований як регулятор з еталонною моделлю стабілізуючої САР каскадної САР універсального ОУ.

Основна ідея предиктивного і каскадного ПІД-регуляторів – за рахунок введення еталонних моделей в замкнений контур регулювання зімітувати регулювання з використанням вимірюваного проміжного параметру універсального ОУ. Обов'язковою умовою є вимірювання і використання в структурі регулятора реальної регулюючої дії (реального входу ОУ), а не просто виходу функціонального блоку регулятора в ПЛК. В цьому випадку в класичному регуляторі з'являється внутрішній додатковий реальний контур регулювання, регулятор стає структурним регулятором; але для нового структурного регулятора САР залишається одноконтурною. Як відомо, практично ефективними є два типи промислових САР – одноконтурна САР і каскадна САР. Для використання каскадної САР потрібно мати можливість вимірювати параметр з проміжної точки універсального ОУ. Якщо такої можливості немає, може бути використана одноконтурна САР з предиктивним або (краще) каскадним регулятором.

Квадратичний регулятор є послідовним з'єднанням двох ПІД-регуляторів. Відсутні будь-які додаткові зв'язки та імпульси. Передатна функція квадратичного регулятора – ПІІ² (звідси і назва

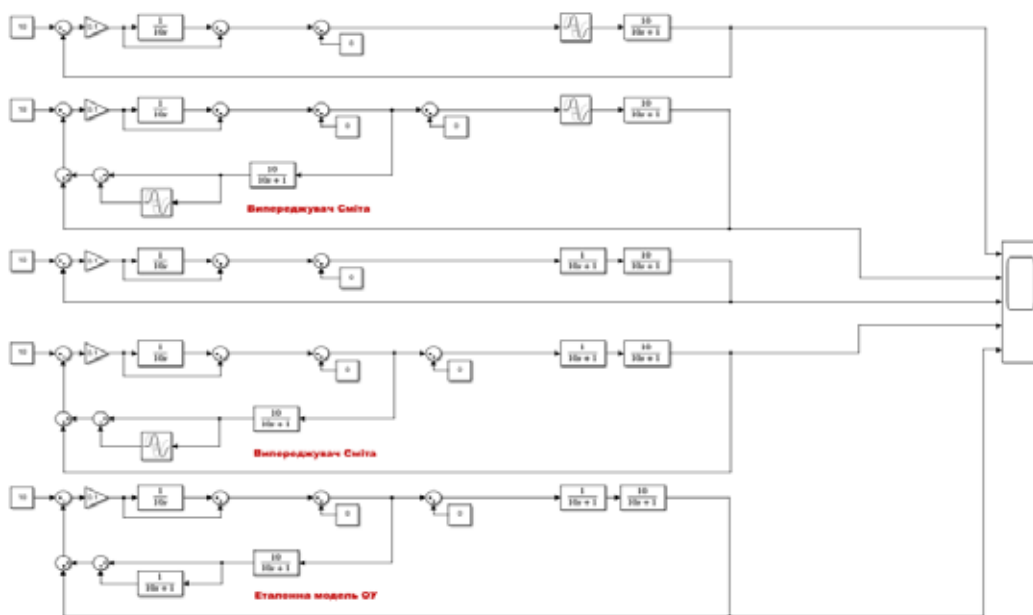


Рис. 1. Модель одноконтурної САР структурним предиктивним регулятором

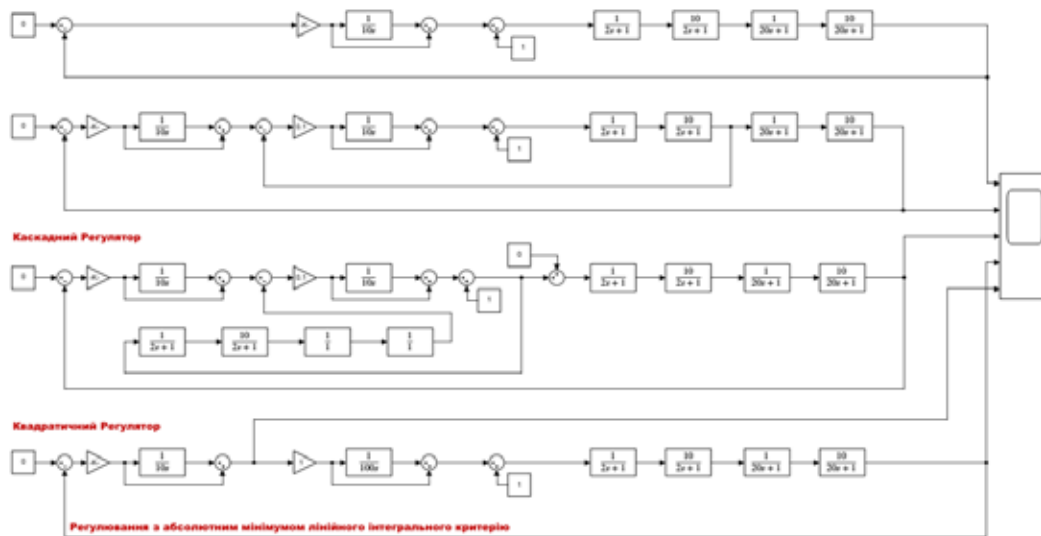


Рис. 2. Моделі одноконтурних САР з структурними каскадним і квадратичним регуляторами

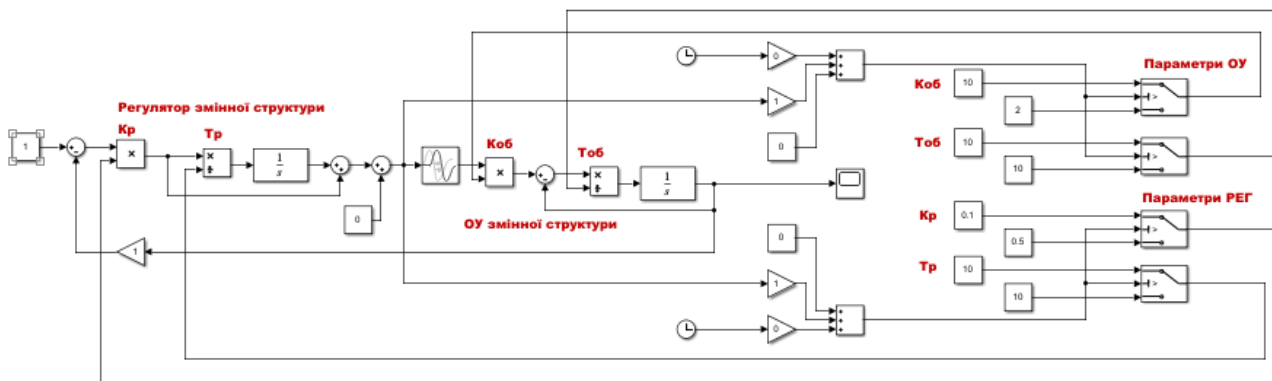


Рис. 3. Модель одноконтурної САР з ПІД-регулятором змінної структури

«квадратичний»). Квадратичний регулятор реалізує абсолютний мінімум лінійного інтегрального критерію – перехідний процес в САР з квадратичним регулятором має нульове значення лінійного інтегралу (площі «плюсових» і «мінусових» напівперіодів взаємно компенсуються).

Дослідження змодельованих одноконтурних САР з структурними ПІД-регуляторами здійснювалось нанесенням сигнальних збурень зі сторони РО (внутрішнє збурення) і зміною завдання. Аналіз чутливості змодельованих одноконтурних САР з структурними ПІД-регуляторами щодо параметричних збурень (дрейфу параметрів ОУ) здійснювалось зміною параметрів структурних регуляторів.

Функціональне імітаційне моделювання одноконтурної САР з ПІД-регулятором змінної структури

Моделювались і досліджувались наступні САР з ПІД-регулятором змінної структури: САР з ОУ змінної структури; САР з нелінійним ОУ (нелінійним РО).

Модель одноконтурної САР з ПІД-регулятором змінної структури наведена на рис. 3.

Динамічна перехідна характеристика САР з ОУ змінної структури кусково-лінійно апроксимована двома лінійними діапазонами постійних значень параметрів ОУ змінної структури. Нелінійна витратна характеристика РО кусково-лінійно апроксимована двома лінійними діапазонами постійних значень параметрів нелінійного ОУ (з причини нелінійного РО, тобто нелінійності робочої витратної характеристики РО).

Дослідження змодельованих одноконтурних САР з ПІД-регуляторами змінної структури здійснювалось нанесенням сигнальних збурень зі сторони РО (внутрішнє збурення) і зміною завдання. Аналіз чутливості змодельованих одноконтурних САР з структурними ПІД-регуляторами щодо параметричних збурень (дрейфу параметрів ОУ) здійснювалось зміною параметрів ПІД-регуляторів змінної структури.

Функціональне імітаційне моделювання комбіновані САР з цифровими двійниками

Моделювались і досліджувались наступні САР: комбінована САР з компенсацією на вхід регулятора; комбінована САР з компенсацією на вихід регулятора; САР зв'язаного регулювання для двомірного ОУ з прямими і перехресними зв'язками; комбінована САР з ЦД як компенсатором зовнішніх (за навантаженням) сигнальних збурень; комбінована САР з ЦД як компенсатором внутрішніх (зі сторони РО) сигнальних збурень.

Комбіновані САР з компенсацією на вхід і вихід регулятора, двомірна САР зв'язаного регулювання моделювались як стандартні структурні схеми відповідних САР.

Модель комбінованої САР з цифровими двійниками наведена на рис. 4.

ЦД в комбінованих САР реалізовані як компенсатори з подачею виходу компенсатору на вихід регулятора (цей спосіб компенсації є кращим за подачу виходу компенсатору на вхід регулятора).

Окремо змодельована комбінована САР з ЦД як компенсатором зовнішніх збурень має в своєму складі прямий ЦД (пряму передатну функцію) каналу ОУ «зовнішнє збурення – регульований параметр» і обернений ЦД (обернену передатну функцію) каналу ОУ «регульовальна дія – регульований параметр».

Окремо змодельована комбінована САР з ЦД як компенсатором внутрішніх збурень має в своєму складі тільки прямий ЦД (пряму передатну функцію) каналу ОУ «внутрішнє збурення – регу-

льований параметр» і не має оберненого ЦД (оберненої передатної функції) каналу ОУ «регульовальна дія – регульований параметр».

Дослідження змодельованих комбінованих САР здійснювалось нанесенням сигнальних збурень навантаженням (зовнішнє збурення), зі сторони РО (внутрішнє збурення), зміною завдання. Основним типом збурення в комбінованій САР, яке потрібно компенсувати, є саме зовнішнє збурення – збурення зміною навантаження (збурення зі сторони РО є основним для каналу регулювання «зміна регульовальної дії – зміна регульованого параметру»). Аналіз чутливості змодельованих комбінованих САР відносно параметричних збурень (дрейфу параметрів ОУ) здійснювалось зміною параметрів компенсаторів.

Результати і висновки. Дослідження змодельованих одноконтурних САР з структурними ПІД-регуляторами щодо сигнальних збурень і аналіз чутливості змодельованих одноконтурних САР з структурними ПІД-регуляторами відносно параметричних збурень дає можливість сформулювати наступні результати і висновки (рекомендації):

1. Одноконтурні САР з структурними ПІД-регуляторами є роботоздатними – забезпечують якісні перехідні процеси регулювання і малочутливі щодо параметричних збурень. Структурні ПІД-регулятори легко можуть бути реалізовані стандартними функціональними блоками сучасних ПЛК;

2. САР з предиктивним і каскадним регулятором може бути використана замість каскадної

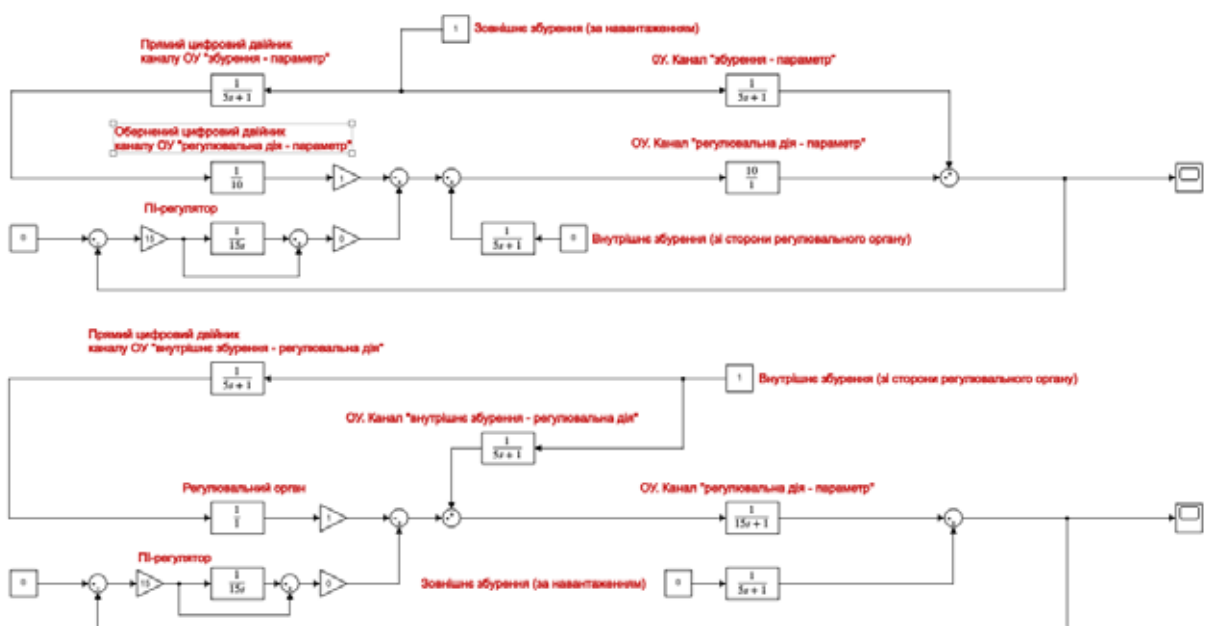


Рис. 4. Модель комбінованої САР з ЦД в СКМ Matlab Simulink

САР для універсальних ОУ, в яких параметр з проміжної точки неможливо виміряти. Обов'язковою умовою є вимірювання і використання в структурі регулятора реальної регулюючої дії (реального входу ОУ), а не просто виходу функціонального блоку регулятора в ПЛК;

3. САР з квадратичним регулятором може бути використана як САР температури в топках, яка забезпечує однакове (постійне) теплове навантаження за час перехідного процесу (перевищення температури компенсуються ідентичними заниженнями температури за час перехідного процесу).

Дослідження змодельованих одноконтурних САР з ПІД-регуляторами змінної структури щодо сигнальних збурень і аналіз чутливості змодельованих САР з ПІД-регуляторами змінної структури відносно параметричних збурень дає можливість сформулювати наступні результати і висновки (рекомендації):

1. Одноконтурні САР з ПІД-регуляторами змінної структури є роботоздатними – забезпечують якісні перехідні процеси регулювання і малочутливі щодо параметричних збурень. ПІД-регулятори змінної структури легко можуть бути реалізовані стандартними функціональними блоками сучасних ПЛК;

2. ПІД-регулятори змінної структури ефективні для нелінійних ОУ, нелінійність яких спричинена суттєвою нелінійністю робочої витратної характеристики РО;

3. ПІД-регулятори змінної структури ефективні для використання в адаптивних САР, в яких на основі моделі або цифрового двійника ОУ розраховуються параметри ОУ, які змінилися внаслідок дрейфу характеристик ОУ (добовий дрейф; сезонний дрейф; віковий дрейф, тобто старіння ОУ).

Дослідження змодельованих комбінованих САР щодо сигнальних збурень і аналіз чутливості змодельованих комбінованих САР відносно параметричних збурень дає можливість сформулювати наступні результати і висновки (рекомендації):

1. Комбінована САР як з компенсацією на вхід регулятора (подача виходу компенсатора на вхід регулятора), так і з компенсацією на вихід регулятора (подача виходу компенсатора на вихід регулятора) легко може бути реалізована в сучасних ПЛК стандартними функціональними блоками. До використання ПЛК реально можливо було реалізувати тільки компенсацію на вхід регулятора (було практично неможливо реалізувати підсумовування фізичних виходів апаратних

регулятора і компенсатору). Сучасні ПЛК дають можливість легко програмно обчислити суму виходів функціональних блоків регулятора і компенсатора, тим самим реалізувати компенсацію на вихід регулятора;

2. Компенсація зовнішнього і внутрішнього збурень на вхід регулятора є неефективною, так як такий компенсатор має мати в своєму складі реальний диференціатор (послідовне з'єднання диференціатору і аперіодичної ланки). Реальний диференціатор легко може бути реалізований в сучасних ПЛК (перемноження практично скільки завгодно малого значення кінцевої різниці на практично скільки завгодно великий коефіцієнт дозволяє реалізувати за скан ПЛК імпульс практично скільки завгодно великої амплітуди; обмеження накладаються тільки типом даних використаних змінних). Проблема полягає в тому, що теплоенергетичні ОУ є «повільними» ОУ. Повільна зміна параметру не є проблемою для обчислення похідної в ПЛК, як вказано вище; проблема в сенсорі – мала зміна параметру знаходиться в межах чутливості вимірювання (приклад: припустімо, що температура зовнішнього середовища, яка є типовим зовнішнім збуренням, змінюється зі швидкістю 1 градус за секунду – і це дуже велика швидкість зміни порівняно з реальною повільною зміною температури зовнішнього середовища; стандартна тривалість фіксованого скану в сучасних ПЛК – не більше 20 мсек; відповідно, якщо кінцеву різницю температури обчислювати навіть за три скани – вона складає всього навсього 0.06 градусу, що є в межах чутливості сенсора; і сенсор не зафіксує цю зміну температури; хоча для самого ПЛК різниця 0.06 цілком достатня для обчислення похідної). Комбінована САР з компенсацією на вхід регулятора не рекомендується для промислового застосування;

3. Компенсація зовнішнього збурення на вихід регулятора є неефективною, так як такий компенсатор є інтегро-диференціальною ланкою, тобто має в своєму складі реальний диференціатор (паралельне з'єднання реального диференціатору і аперіодичної ланки). Причини неефективності застосування реального диференціатору такі ж, як і в п. 2. Комбінована САР з компенсацією зовнішнього збурення на вихід регулятора не рекомендується для промислового застосування;

4. Компенсація внутрішнього збурення на вихід регулятора є ефективною, так як такий компенсатор не містить реального диференціатору, а містить тільки, як правило, аперіодичну ланку, яка легко може бути реалізована в ПЛК. Комбіно-

вана САР з компенсацією внутрішнього збурення на вихід регулятора може бути рекомендована для промислового застосування;

5. Компенсатори в комбінованій САР можуть бути реалізовані як реальні ЦД (тобто як «ідеальні» моделі, керовані вимірюваннями), а не просто у вигляді реального диференціатора або інтегро-диференціальної ланки. Але такі ЦД мають ті ж самі недоліки, що і «прості» компенсатори. Комбінована САР з ЦД як компенсатором зовнішніх збурень не може бути рекомендована для промислового застосування, так як має в своєму складі (крім прямого ЦД каналу ОУ «зовнішнє збурення – регульований параметр») обернений ЦД каналу ОУ «регульовальна дія – регульований параметр» (фактично, обернену передатну функцію ОУ, тобто, фактично, інтегро-диференціальну ланку, як і стандартний компенсатор). Комбінована САР з ЦД як компенсатором внутрішніх збурень може бути рекомендована для промислового застосування, так як має в своєму складі тільки прямий ЦД (пряму передатну функцію) каналу ОУ «внутрішнє збурення – регульований параметр» (тобто, не містить реальної диференціальної або інтегро-диференціальної ланки);

6. Основним збуренням в комбінованій САР, яке треба компенсувати, є зовнішнє збурення, для якого компенсація компенсатором або ЦД, як вказано вище, взагалі неефективна. Внутрішнє

збурення в комбінованій САР не є основним збуренням, яке потрібно компенсувати компенсатором (або ЦД) в комбінованій САР; і ефективною є тільки компенсація внутрішнього збурення компенсатором (або ЦД) на вихід регулятора. В той же час, внутрішнє збурення завжди ефективно компенсується стабілізуючим регулятором в каскадній САР (двоконтурній САР з додатковим інформаційним зв'язком з виміряної проміжної точки ОУ); і така компенсація завжди ефективніша за компенсацію компенсатором (або ЦД) в комбінованій САР. Таким чином, комбінована САР з компенсатором (або ЦД) або взагалі неефективна для зовнішнього збурення, або завжди менш ефективна, ніж каскадна САР, для внутрішнього збурення. Загальний висновок щодо застосування комбінованих САР – комбінована САР не може бути рекомендована для промислового застосування;

7. Система зв'язаного регулювання є реалізацією комбінованої САР, тому має всі недоліки комбінованої САР і, відповідно, не може бути рекомендована для промислового застосування. Перехресні зв'язки в ОУ мають бути ліквідовані технологічним рішенням, а не за рахунок компенсації взаємних збурень. Приклад такого рішення – стабілізація тиску в колекторі, що спричинює ліквідацію перехресних зв'язків в нитках і дозволяє реалізувати замість системи зв'язаного регулювання автономні САР в кожній нитці.

Список літератури:

1. Vilanova, R., Alcántara, S., Pedret, C. 2021. PID Tuning: Analytical approach based on the weighted Sensitivity problem. *Revista Iberoamericana de Automática e Informática Industrial* 18, 313-326. <https://doi.org/10.4995/riai.2021.15422>.
2. Батиук С.Г. Імітаційне моделювання і цифровий твінінг енергетичних кібер-фізичних систем (кібер-енергетичних систем) // Досягнення України та країн ЄС у сфері інновацій і винахідництва в галузі техніки : колективна монографія. С. 44-109. Рига, Латвія : Izdevnieciba "Baltija Publishing", 2022. 544 с. 65 с.

Batiuk S.G., Marianski M.O., Salivon D.V., Fedorov D.D. THERMAL ENERGY SYSTEMS OF AUTOMATIC REGULATION WITH STRUCTURAL REGULATORS AND DIGITAL TWINS

Increasing the efficiency of systems of automatic regulation (SAR) is an urgent task of industrial automation and is implemented in two parallel directions: 1) improvement of the structure and algorithms of SAR; 2) imitation modeling and research of structures and algorithms of SAR with the aim of their optimal configuration and parameterization. The method of control using the internal model of the control object is an extremely effective method of improving the functioning of industrial SARs. The implementation in the closed-loop regulation of the single-circuit SAR the model of the direct channel of the control object leads to the structuring of classic PID-controllers (structural PID-controllers and gain-scheduled PID-controllers). The implementation in opened-loop compensating links of the combined SAR models of channels of internal and external disturbances of the control object leads to the use of compensators as digital twins of the control object.

At the department of automation of energy processes of NTUU of KPI, imitation modeling of improved SAR structures and algorithms was carried out for the purpose of their research and verification. The article presents the results of research in the following thematic directions: 1) development of single-circuit SARs

with structural PID-controllers; 2) development of single-circuit SAR with gain-scheduled PID-controllers; 3) development of combined SAR with digital twins. The platform for imitation modeling of thermal energy SARs is implemented as the album of models in the Matlab Simulink.

The following conclusions and recommendations are formulated on the basis of the study of the simulated SARs with respect to signal disturbances and the analysis of the sensitivity of the simulated SARs with respect to parametric disturbances: 1) single-circuit SARs with structural PID-controllers are workable and effective, they can easily be implemented with standard functional blocks of modern PLCs and are recommended for industrial use; 2) single-circuit SARs with gain-scheduled PID-controllers are workable and effective, they can easily be implemented with standard functional blocks of modern PLCs and are recommended for industrial use; 3) combined SARs with digital twins are practically inoperable, are basically inferior in efficiency to cascade SARs and are not recommended for industrial use.

Key words: *thermal energy, cyber-physical system, automated control system, system of automatic regulation, technological processes automation, software-technical means of automation, imitation modeling, PID-controller, digital twin, edge device, supervisory functionality, controller functionality.*

Батюк С.Г.

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

Семенов А.Д.

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

КАСКАДНА СИСТЕМА АВТОМАТИЧНОГО РЕГУЛЮВАННЯ ТЕПЛООВОГО РЕЖИМУ ПРОМИСЛОВОЇ ТОПКИ

Практична реалізація каскадних САР теплового режиму топок промислових печей є актуальною задачею промислової автоматизації. Особливо актуальним є аналіз можливостей практичного застосування каскадних САР теплового режиму топки з паралельною роботою регуляторів температури, розрідження і співвідношення повітря/паливо для забезпечення ефективного згоряння палива в топці. Для досягнення практичного результату дослідження має бути виконане для конкретного типу промислової печі. Була вибрана скловарна піч як типовий і поширений теплоенергетичний агрегат.

Виконані дослідження одноконтурної САР теплового режиму топки з 3-ма регуляторами, класичної каскадної САР теплового режиму топки з 4-ма регуляторами і запропонованої каскадної САР теплового режиму топки з 6-ма регуляторами. Зроблено порівняльний аналіз цих САР. Розроблені рекомендації з використання цих САР для регулювання теплового режиму промислових топок. Зроблено огляд промислових витратомірів природного газу і розроблені рекомендації з їх застосування в САР теплового режиму промислової топки. Зроблено огляд калориметрів природного газу і розроблені рекомендації з їх застосування в САР теплового режиму промислової топки.

Розроблений полігон імітаційного моделювання каскадної системи автоматичного регулювання теплового режиму промислової топки призначений для: 1) використання в навчальному процесі кафедри автоматизації енергетичних процесів НТУУ КПІ; 2) використання в якості програмно-технічного симулятора при проектуванні, модернізації і тиражуванні АСУТП пічних систем. Програмно-модельним інструментарієм розробки полігону імітаційного моделювання каскадної системи автоматичного регулювання теплового режиму промислової топки є програмно-технічний симулятор автоматизованого технологічного комплексу на платформі Matlab Simulink – CoDeSys – WebStudio.

Ключові слова: автоматизована система управління, каскадна система автоматичного регулювання, автоматизація технологічних процесів, програмно-технічні засоби автоматизації, імітаційне моделювання, скловарна піч, тепловий режим топки печі, регулювання температури, регулювання розрідження, регулювання економічності згоряння палива.

Постановка проблеми. Практична реалізація каскадних САР теплового режиму топок промислових печей є актуальною задачею промислової автоматизації. Особливо актуальним є аналіз можливостей практичного застосування каскадних САР теплового режиму топки з паралельною роботою регуляторів температури, розрідження і співвідношення повітря/паливо для забезпечення ефективного згоряння палива в топці. Для досягнення практичного результату дослідження має бути виконане для конкретного типу промислової печі. Була вибрана скловарна піч як типовий і поширений теплоенергетичний агрегат.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Як зазначено і продемонстровано в [1], надзвичайно ефективним методом покращення функціону-

вання каскадної САР температури промислових топок є використання внутрішньої моделі ОУ (моделі ОУ в замкненому контурі регулювання). Концепція внутрішньої моделі об'єкту управління призводить до використання ПД-регуляторів з паралельними протилежними регулювальними діями в каскадній САР теплового режиму (яка включає САР температурного режиму, САР співвідношення повітря/паливо, САР розрідження) промислової топки.

Скловарна піч – це спеціальний тип печі, який використовується у виробництві скла. Ці печі призначені для плавлення скляних сировинних матеріалів і створення високих температур, необхідних для формування та обробки скла. Скловарні печі можуть мати різні конструкції та способи

опалювання, такі як газові, електричні або комбіновані, для досягнення потрібних температурних режимів. Скловарні печі зазвичай мають спеціальні зони для різних етапів обробки скла, таких як плавлення, формування, охолодження та закріплення. Ці печі використовуються у скловарних заводах та підприємствах для виробництва різноманітних скляних виробів, від пляшок та посуду до віконних склопакетів та скловолокна. Вони є ключовою складовою частиною виробничого процесу створення скляних продуктів і забезпечують необхідні умови для формування та обробки різних типів скла. Робота скловарної печі характеризується технологічним і тепловим режимами.

Тепловий режим промислової топки включає температурний режим, режим згоряння палива, гідравлічний (аеродинамічний) режим:

1. Температурний режим топки. Заданий графік температур димових газів за довжиною топки. Для багатозонної топки – уставки температур димових газів в зонах топки. Для однозонної топки – уставка температури димових газів. Регулююча дія для кожної зони печі – зміна витрати палива через пальник зони печі. ОУ для кожної зони печі – канал передачі дії «зміна витрати палива через пальник зони печі – зміна температури димових газів в зоні печі»;

2. Режим економічності згоряння палива. Заданий графік значень співвідношення повітря/паливо або коефіцієнтів надлишку повітря за довжиною печі. Для багатозонної топки – уставки співвідношень повітря/паливо або коефіцієнтів надлишку повітря в зонах топки. Для однозонної топки – уставка співвідношення повітря/паливо або коефіцієнту надлишку повітря в зоні печі. Регулююча дія для кожної зони печі – зміна витрати повітря через пальник зони печі. ОУ для кожної зони печі – канал передачі дії «зміна витрати повітря через пальник зони печі – зміна співвідношення повітря/паливо або коефіцієнту надлишку повітря в зоні печі»;

3. Гідравлічний режим топки. Задане значення (уставка) розрідження в топці печі (у димовому боріві печі). Регулююча дія (загальна для усієї печі) – зміна витрати димових газів з печі (зміна частоти обертання димососу). ОУ – канал передачі дії «зміна частоти обертання димососу – зміна розрідження в димовому боріві печі». Основним збуренням (за навантаженням) є зміна витрати повітря, так як його витрата приблизно в 10 разів більше за витрату палива. Типовою САР теплового режиму промислової топки є класична одноконтурна САР теплового режиму

(САР з 3-ма регуляторами). В умовах збурень зі сторони РО ефективною є коасична каскадна САР теплового режиму (САР з 4-ма регуляторами). Сучасні засоби автоматизації (а саме ПЛК) дають можливість реалізувати каскадну САР теплового режиму з паралельною роботою регуляторів (САР з 6-ма регуляторами). САР з 6-ма регуляторами реалізує принцип регулювання «один регульований параметр – декілька (дві плюс) регульованих дій», що дозволяє синхронізувати перехідні процеси стабілізації регульованих параметрів, що поєднує якість стабілізації критичних параметрів (для САР теплового режиму таким є співвідношення повітря/паливо, яке визначає якість згоряння палива в топці).

Постановка завдання. Розробити полігон функціонального імітаційного моделювання каскадної САР теплового режиму промислової топки. Змодельовати і дослідити САР теплового режиму. Виконати функціональне імітаційне моделювання і дослідити одноконтурну САР теплового режиму топки з 3-ма регуляторами, каскадну САР теплового режиму топки з 4-ма регуляторами і каскадну САР теплового режиму топки з 6-ма регуляторами. Зробити порівняльний аналіз цих САР. Розробити рекомендації з використання цих САР для регулювання теплового режиму промислових топок. Зробити огляд промислових витратомірів природного газу і розробити рекомендації з їх застосування в САР теплового режиму промислової топки. Зробити огляд калориметрів природного газу і розробити рекомендації з їх застосування в САР теплового режиму промислової топки; Виконати структурне імітаційне моделювання САР теплового режиму промислової топки в програмно-технічному симуляторі на платформі Simulink – CoDeSys – WebStudio.

Виклад основного матеріалу. Розроблений полігон функціонального імітаційного моделювання каскадної САР теплового режиму промислової топки реалізований у вигляді альбому моделей в середовищі СКМ Matlab Simulink як функціональна частина полігону імітаційного SIL-моделювання промислових АТК [2].

Одноконтурна САР теплового режиму топки з 3-ма регуляторами

Модель одноконтурної САР теплового режиму топки наведена на рис. 1. Ця САР має один ТОУ, що складається з чотирьох ОУ і має три регулятори.

Одноконтурна САР теплового режиму промислової топки складається з трьох одноконтурних САР – температурного режиму, режиму згоряння

Функціональне імітаційне моделювання одоконтурної САР теплового режиму топки з 3-ма регуляторами

19.1. Одноконтурна САР теплового режиму промислової топки / Схема з 3-ма регуляторами / 1*ТОУ = 4*ОУ

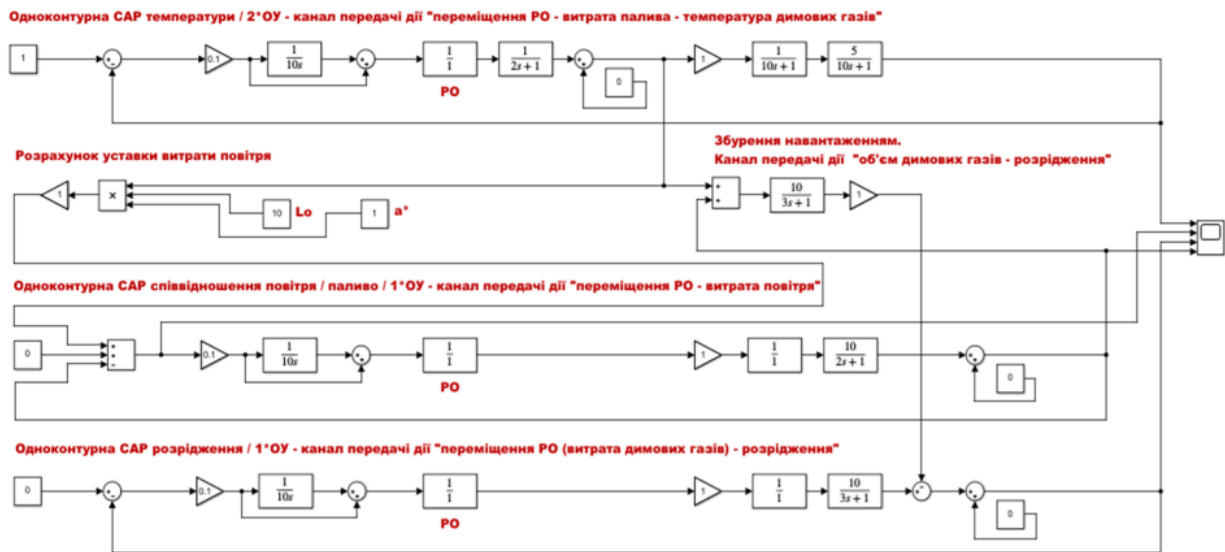


Рис. 1. Модель одноконтурної САР теплового режиму топки з 3-ма регуляторами

палива і гідравлічного режиму. Одноконтурна САР температурного режиму стабілізує температуру димових газів в зоні печі на заданому значенні. ОУ – канал передачі дії «зміна витрати палива – зміна температури». Одноконтурна САР режиму згоряння палива стабілізує співвідношення повітря/паливо на заданому значенні, яке обчислюється за поточною витратою палива, яка вимірюється. Поточна витрата палива домножається на стехіометричний коефіцієнт і заданий коефіцієнт надлишку повітря – це і є завдання регулятору співвідношення. ОУ – канал передачі регульовальної дії «переміщення РО на повітропроводі – витрата повітря». Одноконтурна САР розрідження стабілізує розрідження в топці печі. ОУ є канал передачі дії «зміна витрати димових газів переміщенням РО – розрідження». Основним збуренням САР розрідження є зміна витрати повітря, яка приблизно в 10 разів більша ніж витрата палива, це збурення змодельовано як збурення за навантаженням. Основним регульовальним процесом є стабілізація температури. В ході регулювання температури змінюється завдання регулятору співвідношення паливо/повітря і виникає збурення для САР розрідження.

Графіки перехідних процесів в одноконтурній САР теплового режиму топки наведені на рис. 2. Основними збуреннями для одноконтурної САР є зміна регулятору температури і збурення зі сторони РО витратою палива. Перевагою цієї САР є її простота, надійність і легка реалізація в ПЛК. Осно-

вним недоліком є те, що вона не парирує збурення зі сторони РО, а реагує тільки тоді, коли це збурення змінить температуру димових газів в топці.

Каскадна САР теплового режиму топки з 4-ма регуляторами (класична)

Модель каскадної САР теплового режиму топки з 4-ма регуляторами наведена на рис. 3. Ця САР має один ТОУ, що складається з чотирьох ОУ і має чотири регулятора: один коригуючий і три стабілізуючих.

Каскадна САР теплового режиму топки складається з каскадної САР температури і одноконтурних САР співвідношення паливо/повітря і розрідження в топці печі. Модель каскадної САР аналогічна моделі одноконтурної САР теплового режиму промислової топки в частині формування поточного завдання регулятору співвідношення паливо/повітря і збурення за навантаженням для САР розрідження. В каскадній САР температури коригуючий регулятор температури змінює завдання стабілізуючому регулятору витрати палива. ОУ – канал передачі дії «переміщення РО – витрата палива – зміна температури димових газів».

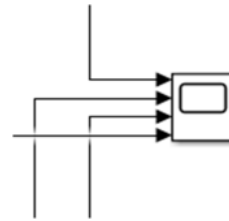
Графіки перехідних процесів в каскадній САР теплового режиму топки з 4-ма регуляторами наведені на рис. 4.

Принциповою і величезною перевагою цієї каскадної САР є той факт, що вона встигає, за рахунок вимірювання витрати палива і каскадного регулювання, парирувати збурення зі сторони РО

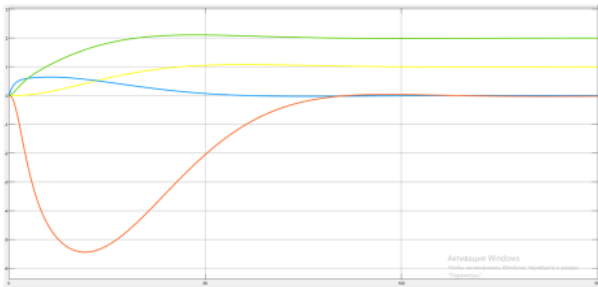
Функціональне імітаційне моделювання одоконтурної САР теплового режиму топки з 3-ма регуляторами

Осцилограф має чотири вхідні сигнали:

- Поточна температура – перший вхід
- Розбаланс на вході регулятора витрати повітря – другий вхід
- Розрідження в топці печі – третій вхід
- Поточна витрата повітря – четвертий вхід



Дані з осцилографа при збуренні зі сторони завдання



Дані з осцилографа при збуренні зі сторони витрати палива

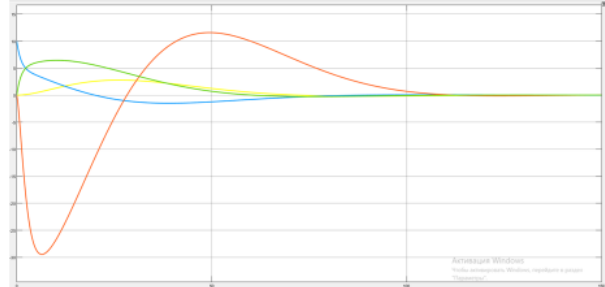


Рис. 2. Графіки перехідних процесів в одоконтурній САР теплового режиму топки з 3-ма регуляторами

Функціональне імітаційне моделювання каскадної САР теплового режиму топки з 4-ма регуляторами

19.2. Каскадна (двокаскадна) САР теплового режиму промислової топки / Схема з 4-ма регуляторами (1-ий коригуючий, 3-ри стабілізуючі) / 1*ТОУ = 4*ОУ

Каскадна САР температури / 2*ОУ - канали передачі дії "переміщення РО - витрата палива - температура димових газів"

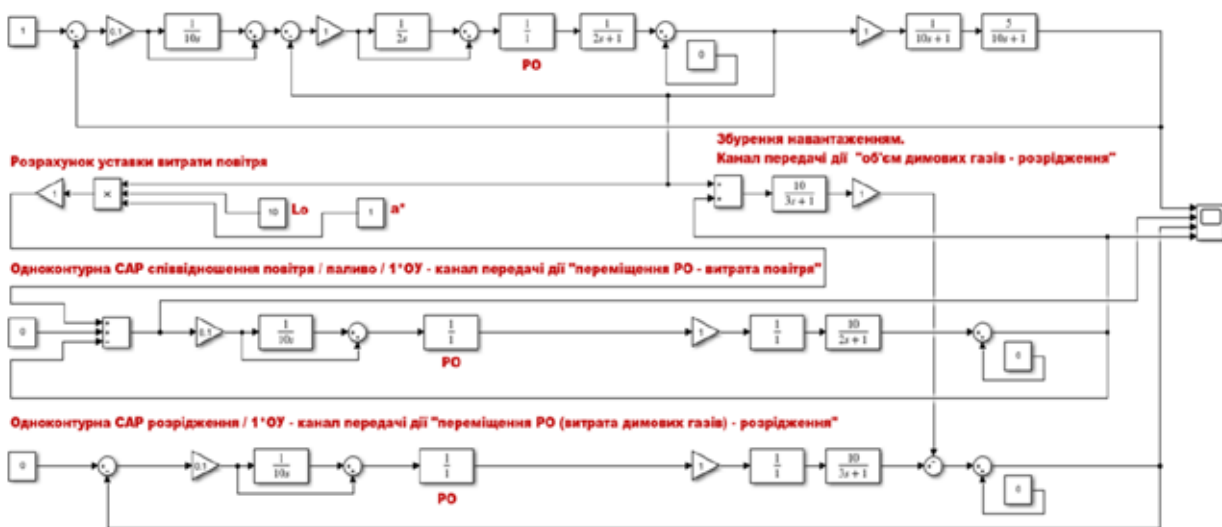


Рис. 3. Модель каскадної САР теплового режиму топки з 4-ма регуляторами

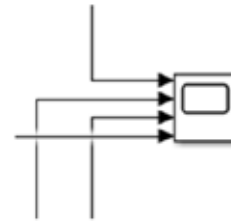
витратою палива ще до того, як це збурення суттєво змінить температуру димових газів в топці. За збуренням зі сторони РО каскадна САР теплового режиму топки має незаперечну і принципову перевагу над одоконтурною САР теплового режиму топки. За збуренням зміною завдання (як і за збуренням навантаженням) каскадна САР теплового режиму топки працює так само, як і одоконтурна САР теплового режиму топки. Для

реалізації принципової переваги каскадної САР теплового режиму топки потрібно вимірювати витрату палива. Звідси виникає проблема правильного вимірювання витрати і вибору правильного витратомірюю. Недостатньо вимірювати просто об'ємну витрату газу, так як, в залежності від тиску і температури газу, та сама об'ємна витрата може бути іншою масовою витратою. Тому потрібно або приводити виміряну об'ємну витрату

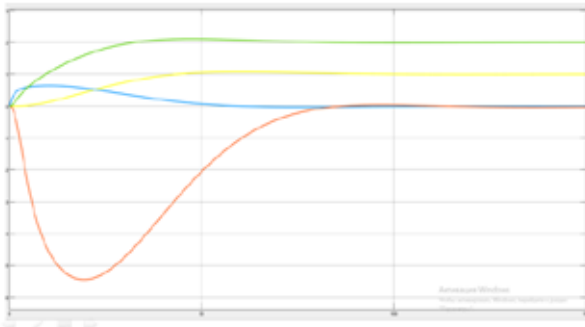
Функціональне імітаційне моделювання каскадної САР теплового режиму топки з 4-ма регуляторами

Осцилограф має чотири вхідні сигнали:

- Поточна температура – перший вхід
- Розбаланс на вході регулятора витрати повітря – другий вхід
- Розрідження в топці печі – третій вхід
- Поточна витрата повітря – четвертий вхід



Дані з осцилографа при збуренні зі сторони завдання



Дані з осцилографа при збуренні зі сторони витрати палива

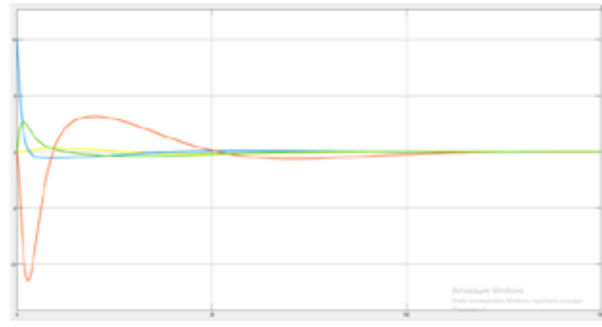


Рис. 4. Графіки перехідних процесів в каскадній САР теплового режиму топки з 4-ма регуляторами

до нормальних умов (датчики тиску і температури можуть бути або вбудовані в об'ємний витратомір, або змонтовані окремо), або використовувати масовий витратомір. Але і цього, взагалі-то, недостатньо. При одній і тій самій масовій витраті, в залежності від хімічного складу газу, може змінюватись теплотворна здатність палива. В ідеалі, витратомір палива має бути калориметром палива і вимірювати витрату палива у ватах. Питання вибору витратоміру палива досліджувалось для з'ясування техніко-економічної доцільності використання дорогих витратомірів замість бюджетних об'ємних витратомірів без корекції (без приведення до нормальних умов).

Каскадна САР теплового режиму топки з 6-ма регуляторами (запропонована)

Модель каскадної САР теплового режиму топки з 6-ма регуляторами наведена на рис. 5. Ця САР має один ТОУ, що складається з чотирьох ОУ і має шість регуляторів: три коригуючі і три стабілізуючі. Ці ОУ мають таку ж структуру як і ОУ в моделі каскадної САР теплового режиму промислової топки з 4-ма регуляторами.

Вище були змодельовані класичні одноконтурна САР теплового режиму топки з 3-ма регуляторами і каскадна САР теплового режиму топки з 4-ма регуляторами. Ці змодельовані САР є типовими для пічних систем і коректно працюють. Але для скловарних печей швидкість регулювання температури не є важливим аспектом,

на відміну від регулювання співвідношення повітря/паливо і розрідження в топці печі. Ба більше, швидка зміна температури в скловарній печі є дуже поганим впливом на якість виготовленої продукції, адже скломаса у варочному басейні печі нагрівається нерівномірно, що спричиняє виготовлення бракованої склотари. В скловарній печі температура має регулюватись повільно, щоб запобігти тепловим збуренням в рідкій скломасі в басейні печі (тим самим зменшити можливий брак). Так як процес регулювання температури в топці скловарної печі є довгий (десятки хвилин і навіть години), то неперервно змінюється витрата палива, як наслідок, неперервно змінюється поточне значення співвідношення повітря/паливо і розрідження. Тому актуальним є таке регулювання теплового режиму, коли співвідношення повітря/паливо і розрідження будуть витримуватись на уставках весь час регулювання температури. Інакше кажучи, САР теплового режиму топки скловарної печі має «пригальмувати» швидкість стабілізації температури димових газів в топці і «пришвидшити» стабілізації співвідношення повітря/паливо і розрідження в топці. Запропонована каскадна САР теплового режиму топки з 6-ма регуляторами якраз і покликана реалізувати цю функціональність. Інструментарій такої реалізації – паралельні протнаправлені регулювальні дії коригуючих регуляторів (принцип «один регульований параметр – дві регулювальні дії»).

Функціональне імітаційне моделювання каскадної САР теплового режиму топки з 6-ма регуляторами

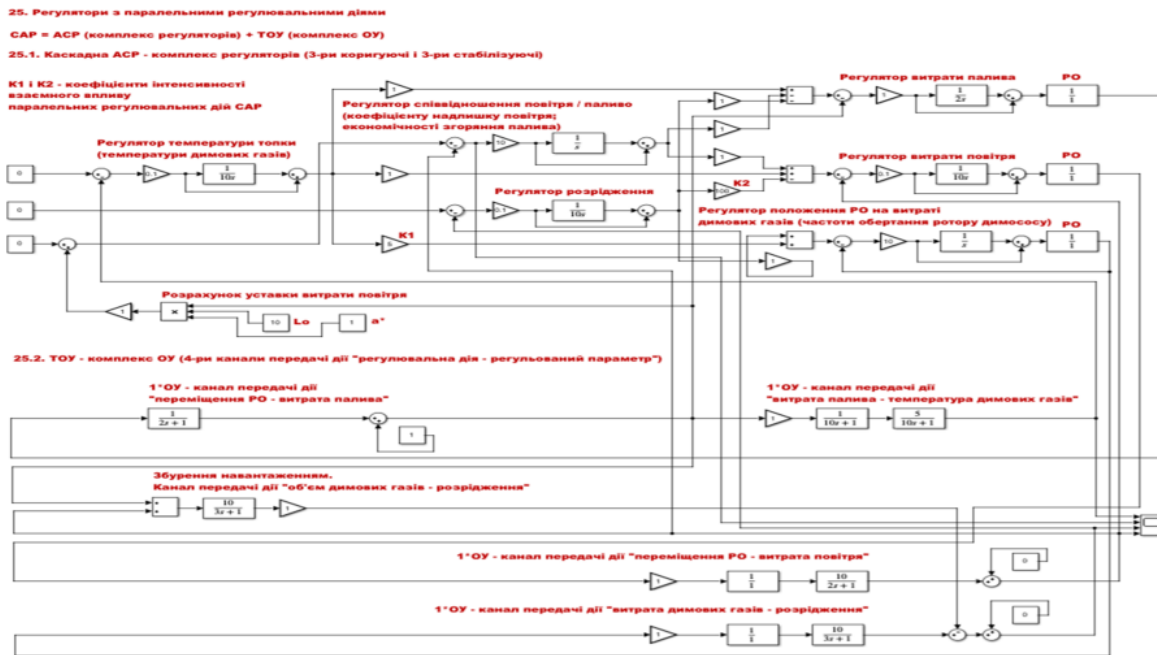


Рис. 5. Модель каскадної САР теплового режиму топки з 6-ма регуляторами

Каскадна САР теплового режиму з 6-ма регуляторами складається з каскадної САР температури, каскадної САР співвідношення паливо/повітря і каскадної САР розрідження в топці печі. Поточне задане значення витрати повітря і збурення за навантаженням для САР розрідження реалізовані аналогічно, як в наведених раніше моделях одноконтурної (з 3-ма регуляторами) і каскадної (з 4-ма регуляторами) САР теплового режиму. Особливістю каскадної САР з 6-ма регуляторами є той факт, що коригуючі регулятори паралельно формують завдання різним стабілізуючим регуляторам і з різними знаками. Стабілізуючі регулятори положення РО на повітропроводі і положення РО на дымоході (регулятор частоти обертання димососу) введені в схему штучно, саме для того, щоб програмно (або апаратно) реалізувати вказані вище паралельні коригувальні дії з різними знаками. Така структура призводить до сповільнення і погіршення перехідного процесу регулювання температури, але значно пришвидшує і покращує перехідні процеси регулювання співвідношення повітря/паливо і розрідження в процесі регулювання температури. Головним регулятором в цій каскадній САР є коригуючий регулятор температури топки. Такий підхід до регулювання температури є актуальним саме для скловарних печей, в яких сама технологія скловаріння вимагає повільного регулювання температури димових

газів в топці (тим більше, температури скламаси в басейні печі).

В каскадній САР теплового режиму топки з'являються два додаткових параметри налагодження, яких не було в одноконтурній (з 3-ма регуляторами) і каскадній (з 4-ма регуляторами) САР теплового режиму топки (додаткові параметри налагодження додаткових регуляторів не враховуються, так як це не принципово). Коефіцієнти $K1$ і $K2$ – це додаткові параметри налагодження каскадної САР з 6-ма регуляторами. Моделюванням виявлено, що саме ці два коефіцієнти є найбільш дієвими. $K1$ – це коефіцієнт корекції від регулятора температури на регулятор положення РО на витраті газів. $K2$ – це коефіцієнт корекції від регулятора розрідження на регулятор витрати повітря. Обидва ці коефіцієнти пов'язані з розрідженням. Моделюванням встановлено, що перехідні процеси даної каскадної САР є малочутливими до варіацій параметрів $K1$ і $K2$.

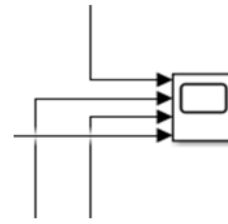
Графіки перехідних процесів в каскадній САР теплового режиму топки з 6-ма регуляторами наведені на рис. 6.

Каскадна САР теплового режиму з 6-ма регуляторами, як і попередня каскадна САР теплового режиму з 6-ма регуляторами, парирує збурення зі сторони РО ще до того, як ця зміна зміни витрати палива викличе суттєву зміну температури димових газів в топці. На додаток до попередньої каскадної САР з 4-ма регуляторами ця каскадна САР

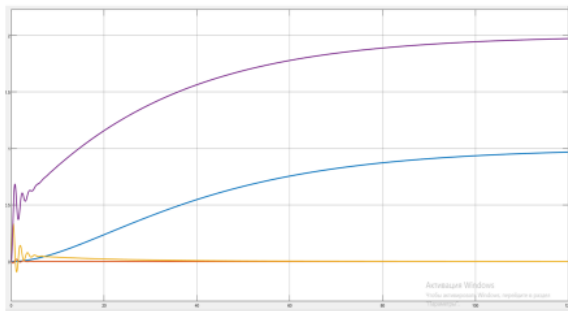
Функціональне імітаційне моделювання каскадної САР теплового режиму топки з 6-ма регуляторами

Осцилограф має чотири вхідні сигнали:

- Поточна температура – перший вхід
- Розбаланс на вході регулятора витрати повітря – другий вхід
- Розрідження в топці печі – третій вхід
- Поточна витрата повітря – четвертий вхід



Дані з осцилографа при збуренні зі сторони завдання



Дані з осцилографа при збуренні зі сторони витрати палива

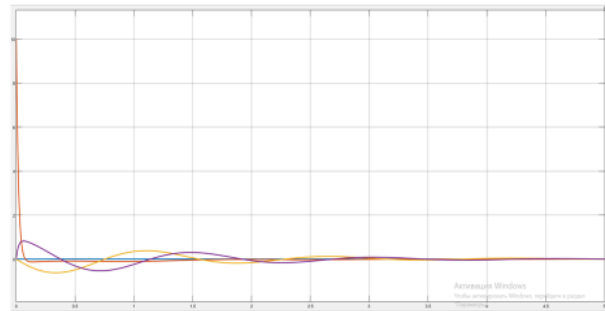


Рис. 6. Графіки перехідних процесів каскадної САР теплового режиму топки з 6-ма регуляторами

з 6-ма регуляторами забезпечує практично ідеальну стабілізацію співвідношення і розрідження в процесі повільного регулювання температури без її перерегулювань і коливань. Співвідношення повітря/паливо краще стабілізується, ніж в попередніх САР, тому що воно регулюється як зміною витрати повітря, так і зміною витрати палива (в попередніх САР – тільки витратою повітря). Розрідження краще стабілізується, ніж в попередніх САР, тому що воно регулюється як зміною частоти обертання димососу, так і зміною витрати повітря (в попередніх САР – тільки частотою обертання димососу). За рахунок такого взаємносповільнюючого регулювання перехідний процес САР температури суттєво сповільнюється і є аперіодичним і дуже затягнутим. Для скловарних печей, внаслідок особливості технологічного процесу варки скла, саме такий повільний процес регулювання температури є кращим, ніж швидкісний з перерегулюваннями і коливаннями.

Структурне імітаційне моделювання каскадної САР теплового режиму топки

Скриншоти вікон програмних застосунків полігону структурного імітаційного моделювання каскадної САР теплового режиму наведені на рис. 7.

ТОУ змодельований в СКМ Matlab Simulink як універсальний ОУ; тобто, як ОУ з випереджальною та інерційною частинами і вимірюванням параметру з проміжної точки (між виперед-

жальною і вимірювальною частинами). В якості такого параметру з проміжної точки в різних стабілізуючих САР каскадних САР теплового режиму топки з 4-ма і 6-ма регуляторами виступають витрата палива, положення РО на повітропроводі і положення РО на димоході (регулятор частоти обертання димососу). Так як змодельований ТОУ у вказаному вище сенсі є універсальним, а кожна САР є автономною (немає ніяких компенсаційних зв'язків між САР; а взаємовплив САР є шкідливим збуренням, на які САР штатно реагують), він може бути використаний для моделювання будь-якого ОУ як в каскадній САР, так і в одноконтурній САР.

Контролерна функціональність реалізована в софтПЛК CoDeSys 3.5. АСР в ПЛК реалізована як універсальна АСР; тобто, як каскад коригуючого і стабілізуючого регуляторів. Так як реалізована АСР у вказаному вище сенсі є універсальна, вона може бути використана для реалізації як каскадної, так і одноконтурної САР (в останньому випадку АСР редукується користувачем до одного регулятора – коригуючого, який виступає вже в якості стабілізуючого і вже сам напряму переміщує РО, а не змінює завдання стабілізуючому регулятору параметру з проміжної точки ОУ).

Супервізорна функціональність реалізована в НМІ/SCADA-системі AVEVA WebStudio.

Так як всі САР є принципово автономні (тобто принципово не мають взаємних компенсаційних

Структурне імітаційне моделювання САР теплового режиму промислової топки

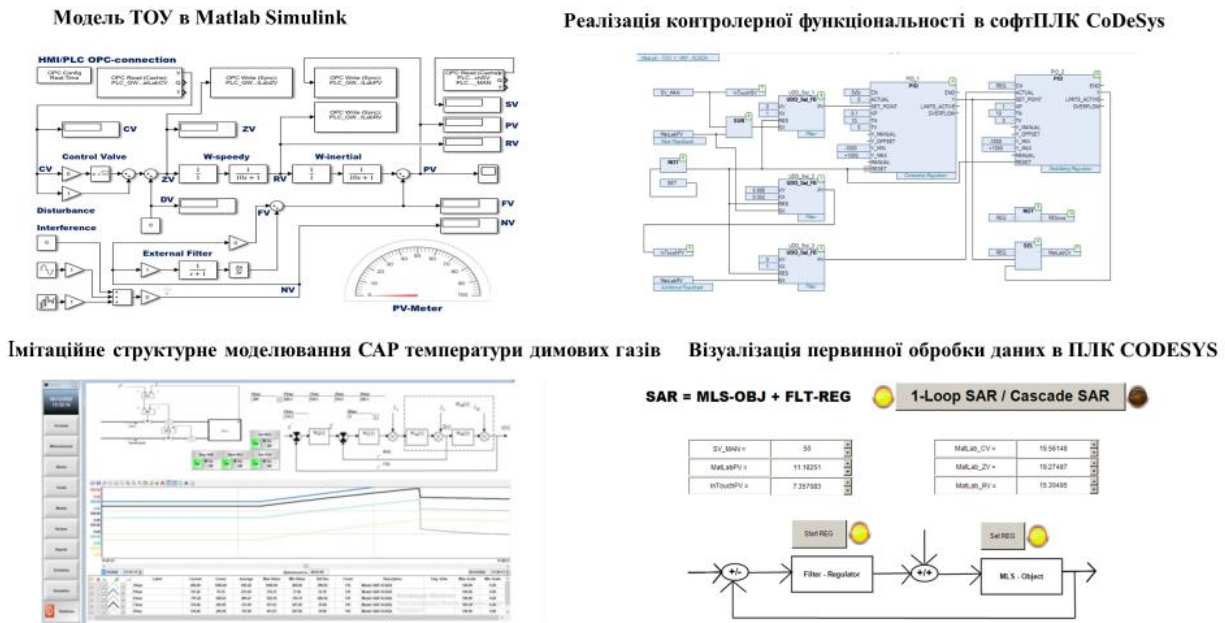


Рис. 7. Скриншоти полігону структурного імітаційного моделювання каскадної САР теплового режиму промислової топки

зв'язків для «покращення» регулювання), немає сенсу в структурному моделюванні TOU так, як це було зроблено в функціональному моделюванні. В функціональному моделюванні досліджувались зв'язки між САР через ОУ, які виступали як збурення для сторонніх САР; досліджувались і визначались переваги запропонованої структури САР теплового режиму топки (каскадна САР теплового режиму топки з 6-ма регуляторами) над класичними структурами САР теплового режиму топки (одноконтурна САР теплового режиму топки з 3-ма регуляторами і каскадна САР теплового режиму топки з 6-ма регуляторами). В структурному моделюванні моделюються не функції САР (це робить функціональне моделювання), а структура кожної локальної САР в структурі глобальної САР теплового режиму топки (тобто, взаємодія оператора HMI/SCADA-системи з ПЛК і «фізичним» TOU, змодельованим в СКМ); також моделюється налагодження кожної локальної САР як автономної від інших локальних САР.

Функціональне і структурне моделювання – це два принципово різні різновиди імітаційного моделювання, які доповнюють один одного і використовуються моделістом в послідовності «постановка задачі – функціональне моделювання – структурне моделювання».

Окремим питанням є питання про можливість і доцільність використання цифрового твінінгу в структурному імітаційному моделюванні про-

мислових САР взагалі і в каскадній САР теплового режиму топки окремо.

Цифровий твінінг – це розробка і впровадження цифрових двійників (ЦД). ЦД – керована реальними вимірними сигналами цифрова копія фізичного активу для оптимізації активу в реальному часі впродовж всього циклу життя активу.

З позицій імітаційного моделювання, ЦД – це емулятор фізичного активу; тобто симулятор фізичного активу (імітаційна модель), зв'язаний з цим фізичним активом через реальні (тобто вимірювані в реальному часі) технологічні і параметричні збурення на цей фізичний актив. Прототипом ЦД називають імітаційну модель ОУ, в якій збурення на ОУ програмно імітуються (а не вимірюються). Екземпляром ЦД називають імітаційну модель ОУ, в якій збурення на ОУ вимірюються (а не програмно імітуються) і враховуються в моделі в реальному часі, тобто в темпі з роботою ОУ.

Структурно САР з ЦД є класичними комбінованими САР, в яких ЦД використовуються як компенсатори збурень – внутрішніх і зовнішніх. Розуміння цього факту накладає чіткі категоричні обмеження на застосування ЦД в САР. Комбіновані САР є практично неефективними САР і використовуються дуже обмежено. Використання ЦД (компенсаторів) зовнішніх збурень неефективне з причини необхідності мати реальний диференціатор в ЦД, що практично неможливо реалізувати. Використання ЦД (компенсаторів) внутріш-

ніх збурень (збурень зі сторони РО) поступаються ефективністю каскадним САР, які розроблені саме для компенсації внутрішніх збурень і є ідеальними для цього. В запропонованій каскадній САР теплового режиму з 6-ма регуляторами використовуються три саме каскадні САР, тому використання ЦД є недоцільним з причини їх низької ефективності для регулювання в замкненому і розімкненому контурах.

ЦД (імітаційні моделі з підключенням до сенсорів) має сенс використовувати в системах технічної діагностики для задач предиктивного обслуговування технологічного обладнання на основі інформації від кількісних і якісних давачів. Не має сенсу використовувати в контурах регулювання (замкнених) і компенсації (розімкнених) САР. Стандартні імітаційні моделі (імітаційні моделі без підключення до сенсорів) має сенс використовувати для налагодження і тестування АСУ. Не має сенсу використовувати в системах технічної діагностики для задач предиктивного обслуговування.

Результати і висновки. Дослідження змодельованих комбінованих САР щодо сигнальних збурень і аналіз чутливості змодельованих комбінованих САР щодо параметричних збурень дає можливість сформулювати наступні результати і висновки (рекомендації):

1. Одноконтурна САР теплового режиму промислової топки з 3-ма регуляторами, каскадна САР теплового режиму промислової топки з 4-ма регуляторами і каскадна САР теплового режиму промислової топки з 6-ма регуляторами при збуренні зі сторони завдання мають практично однакові перехідні характеристики. При збуренні зі сторони РО перехідні процеси в каскадній САР теплового режиму промислової топки з 4-ма регуляторами набагато кращі ніж в одноконтурній САР теплового режиму промислової топки з 3-ма регуляторами. В каскадній САР теплового режиму промислової топки з 6-ма регуляторами перехідні процеси при збуренні зі сторони РО суттєво кращі навіть ніж в каскадній САР теплового режиму промислової топки з 4-ма регуляторами;

2. Основною промисловою САР теплового режиму топки, безумовно, є одноконтурна САР теплового режиму промислової топки з 3-ма регуляторами, яка включає в себе три одноконтурні САР температури, співвідношення паливо/повітря і розрідження. Вона надійно працює, легко реалізується, як в ПЛК, так і автономними регуляторами, але має недолік в тому, що не парює збурення зі сторони РО;

3. Каскадна САР теплового режиму промислової топки з 4-ма регуляторами в свою чергу рекомендується до використання, як найбільш оптимальна, тому що вона також легко реалізується як в ПЛК, так і автономними регуляторами і вона має суттєву перевагу над одноконтурною САР теплового режиму промислової топки з 3-ма регуляторами, адже вона парює збурення зі сторони РО. Вона складається з каскадної САР температури, одноконтурної САР співвідношення паливо/повітря і одноконтурної САР розрідження в топці в печі;

4. Каскадна САР теплового режиму промислової топки з 6-ма регуляторами складається з трьох каскадних САР температури, співвідношення паливо/повітря і розрідження в топці печі. Ця САР має три коригуючі і три стабілізуючі регулятори (звідси і назва САР). Особливістю цієї каскадної САР є її одночасна робота стабілізуючих регуляторів за рахунок паралельної подачі коригуючих сигналів з різними знаками на входи цих стабілізуючих регуляторів. При збуренні зі сторони завдання каскадна САР теплового режиму промислової топки з 6-ма регуляторами працює так само як одноконтурна САР теплового режиму промислової топки з 3-ма регуляторами і каскадна САР теплового режиму промислової топки з 4-ма регуляторами, а при збуренні зі сторони РО каскадна САР теплового режиму промислової топки з 6-ма регуляторами працює найкраще з усіх. Але недоліком каскадної САР теплового режиму промислової топки з 6-ма регуляторами є її практично неможлива реалізація за допомогою автономних регуляторів і складна реалізація в ПЛК;

5. Одноконтурна САР теплового режиму промислової топки з 3-ма регуляторами є прийнятною, але каскадна САР теплового режиму промислової топки з 4-ма регуляторами рекомендується, як найбільш оптимальна для роботи, а каскадна САР теплового режиму промислової топки з 6-ма регуляторами рекомендується для роботи в сходових печах, де потрібно дуже повільно регулювати температуру;

6. Каскадна САР температури принципово і суттєво краще за одноконтурну САР з цієї причини вимірювання витрати палива є актуальним. Витрати палива можуть вимірюватися в об'ємних одиницях (наприклад в м³/сек), масових одиницях (кг/сек) і у ватах (Дж/сек). Об'ємні витратоміри не є ефективним рішенням, так як в одному кубічному метрі газу при різних тиску і температурі газу можуть бути різні кілограми. Тому об'ємний витратомір може фіксувати ту саму об'ємну

витрату, але масова витрата змінюється («спалюється не метри кубічні, а кілограми»). Можливі два варіанти. Перший варіант – використовувати масові витратоміри. Другий – використовувати об'ємні витратоміри з корекцією об'ємної витрати за вимірними самим витратоміром температурою і тиском газу. Такі об'ємні витратоміри з корекцією приводять вимірну об'ємну витрату до нормальних умов (0.1 МПа і 273 К), що фактично еквівалентно вимірюванню масової витрати. Рекомендують використовувати як масові, так і об'ємні витратоміри з корекцією, так як їх вартість приблизно однакова;

7. Ідеальним варіантом є використання калориметрів, які вимірюють витрату палива в ватах, Калорійність палива залежить від його хімічного складу і повністю характеризує тепловіддачу від

димових газів. Аналіз показав, що такі калориметри існують, але використовуються тільки для лабораторних аналізів і поки що не можуть бути використані в реальному часі в замкненому контурі регулювання. Використання калориметрів в САР наразі не є можливим, через їхню надмірну вартість (в середньому 2000000 грн), габаритність, не пристосованість калориметрів до агресивного середовища, вибухонебезпечність і додаткову витрату палива для спалювання в камері калориметра. Також причиною відсутності потреби у калориметрах є той факт, що підприємство при купівлі газу отримує від постачальника протокол аналізу цього газу. В протоколі міститься інформація про калорійність постачаного газу. Тому використання калориметрів не виходить за межі лабораторних аналізів.

Список літератури:

1. Y.V. Panvan Kumar, Arvapalli Rajesh, SadhuYugandhar and Viswaraju Srikant, "Cascaded PID Controller Design For Heating Furnace Temperature Control," IOSR Journal of Electronics and Communication Engineering (IOSR-JECE) e-ISSN: 2278-2834, p-ISSN:2278-8735. Volume 5, Issue 3 (Mar. -Apr. 2013), PP 76-83.

2. Батюк С.Г. Імітаційне моделювання і цифровий твінінг енергетичних кібер-фізичних систем (кібер-енергетичних систем) // Досягнення України та країн ЄС у сфері інновацій і винахідництва в галузі техніки : колективна монографія. С. 44-109. Рига, Латвія : Izdevniecība "Baltija Publishing", 2022. 544 с. 65 с.

Batiuk S.G., Semenov A.D. CASCADE SYSTEM OF AUTOMATIC REGULATION OF INDUSTRIAL FURNACE HEAT REGIME

The practical implementation of cascade system of automatic regulation of the heat regime of industrial furnaces is an urgent task of industrial automation. The analysis of the possibilities of practical application of cascade systems of automatic regulation of the furnace heat regime with parallel operation of temperature, rarefaction and air/fuel ratio regulators to ensure efficient combustion of fuel in the furnace is especially relevant. To achieve a practical result, the study should be performed for a specific type of industrial furnace. A glass furnace was chosen as a typical and common heat energy unit.

Functional imitation modeling and investigate a single-loop system of automatic regulation (SAR) of a furnace heat regime with 3 regulators, a cascade SAR of a furnace heat regime with 4 regulators and a cascade SAR of a furnace heat regime with 6 regulators were performed. Comparative analysis of these SARs were performed. Recommendations for the use of these SARs to regulate the heat regime of industrial furnaces were performed. The inspection of industrial natural gas flowmeters and recommendations for their use in the SAR of the heat regime of an industrial furnace were performed. The inspection of natural gas calorimeters and recommendations for their use in the SAR of the heat regime of an industrial furnace were performed.

The developed test site for imitation modeling of the cascade system of automatic regulation of the thermal regime of an industrial furnace is intended for: 1) use in the educational process of the department of automation of energy processes of NTUU KPI; 2) use as a software-technical simulator in the design, modernization and replication of the automated control systems of technological processes of furnace systems. The program-modeling toolkit for the development of a training ground for simulation modeling of a cascade system of automatic regulation of the thermal regime of an industrial furnace is the software-technical simulator of an automated technological complex on the Matlab Simulink – CoDeSys – WebStudio platform.

Key words: *automated control system, cascade system of automatic regulation, automation of technological processes, software-technical means of automation, imitation modeling, glass furnace, heat regime of the furnace, temperature regulation, rarefaction regulation, fuel combustion efficiency regulation.*

Бейрак Д.Я.

Державний університет «Житомирська політехніка»

Вакалюк Т.А.

Державний університет «Житомирська політехніка»

ПІДХОДИ ДО ДЕКОМПОЗИЦІЇ ПРЕДМЕТНОЇ ОБЛАСТІ У ПОБУДОВІ МІКРОСЕРВІСНИХ СИСТЕМ В НАУКОВІЙ ЛІТЕРАТУРІ

На сьогоднішній день продовжує актуалізовуватись питання побудови мікросервісних систем, яке є комплексним та багатоаспектним. Мікросервісна архітектура дозволяє будувати системи з низькою зв'язністю, що, завдяки можливості горизонтального масштабування та за рахунок того, що менші окремі сервіси простіше розуміти та змінювати, ніж складні великі моноліти, покращує такі архітектурні параметри як масштабованість, можливість підтримки, ефективність використання ресурсів тощо. Ці та інші причини впливають на вибір спеціалістів в індустрії, які все частіше роблять його на користь саме цього типу архітектури при розробці нових систем, а також рухаються у напрямку міграції наявних успадкованих монолітів на мікросервіси. Важливими питаннями, що постають перед інженерами та архітекторами, які обирають мікросервісну архітектуру, є декомпозиція предметної області при розробці нових мікросервісів та декомпозиція вже наявної монолітної системи при переведенні її на мікросервісну архітектуру. Так як саме якість декомпозиції має первинний суттєвий вплив на весь подальший розвиток системи, виникає потреба у виборі відповідних методів та інструментів для виконання даного процесу. В даній статті розглядаються методи та інструменти, призначені для розв'язання задач декомпозиції предметної області при проектуванні мікросервісних систем «з нуля» та успадкованих монолітних систем при переведенні їх на мікросервісну архітектуру. Для кожного з цих аспектів міститься як висвітлення усталених в індустрії підходів та патернів, так і огляд методів та інструментів, що наразі здебільшого розглядаються в наукових публікаціях. Окрім поділу методів на ті, що застосовуються при побудові систем «з нуля», та ті, що використовуються при роботі з успадкованими монолітами, розглянуті у статті підходи та інструментарій також можна умовно розділити на мануальні (ручні), напівавтоматизовані та автоматизовані. Крім того, в основу роботи розглянутих методів та інструментів покладено різні варіанти декомпозиції, застосування метрик, використання історій користувачів (user stories), сценаріїв використання (use cases) та діаграм потоків, застосування кластеризації та аналіз графів, аналіз даних та пов'язаного з ними функціоналу системи тощо.

Ключові слова: мікросервісна архітектура, декомпозиція, моделювання, міграція, патерни.

Постановка проблеми. Сьогодні все більше нових проектів створюється на основі мікросервісної архітектури, а також все більше компаній намагаються перевести на дану архітектуру успадковані монолітні системи задля підвищення конкурентоспроможності своїх продуктів на ринку. Від рішень, прийнятих на етапі декомпозиції, у значній мірі залежить подальший розвиток мікросервісної системи, її спроможність відповідати узгодженим із стейкхолдерами показникам та характеристикам, вартість подальшої підтримки та реалізації нового функціоналу тощо. Дані фактори роблять актуальними дослідження наявних рішень декомпозиції предметної області, як при написанні мікросервісних систем «з нуля», так і декомпозиції успадкованих монолітних систем у мікросервісні.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Проблеми декомпозиції у контексті мікросервісної архітектури розглядалися в науковій літературі та публікаціях багатьма авторами та вченими. Зокрема, такі підходи розглядали Кріс Річардсон (Chris Richardson) [1], Сем Ньюман (Sam Newman) [2], Марк Річардс (Mark Richards) та Ніл Форд (Neal Ford) [3]. Інші, менш відомі поза академічним колом підходи, розглядали Чайтанья К. Рудрабхатла (Chaitanya K. Rudrabhatla) [4], Фреді Вера-Рівера (Fredy H. Vera-Rivera) [5], Мохаммед Дауд (Mohamed Daoud) [6], Седігена Хошневіса (Sedigheh Khoshnevis) [7], Шаньшань Лі (Shanshan Li) [8], Діпалі Баджадж (Deepali Bajaj) [9], Аніта Гоель (Anita Goel) [9], Суреш Гупта (Suresh Gupta) [10], Манабу Камімура (Manabu Kamimura) [11], Мігель Бріто (Miguel Brito) [12],

Луїс Карвальо (Luiz Carvalho) [13], Омар Аль-Дебагі (Omar Al-Debagy) [14], Лулай Чжу (Lulai Zhu) [15], Діпалі Баджадж (Deepali Bajaj) [9,10], Сімоні Стаффа (Simone Staffa) [16,17], Джованні Кватроккі (Giovanni Quattrocchi) [16,17] та інші.

Постановка завдання. Метою статті є детальний огляд підходів до декомпозиції предметної області та наявних монолітних систем у контексті побудови мікросервісної архітектури.

Виклад основного матеріалу. Здебільшого, інженери та науковці галузі розглядають питання декомпозиції предметної області з двох позицій: проектування мікросервісних систем «з нуля» (greenfield) та міграції монолітних систем у мікросервісні (brownfield). Варто зауважити, що ряд патернів, які розглядаються у даному контексті, універсальні, та можуть бути застосовані для будь-якого з цих сценаріїв.

В індустрії найбільш поширеними з позицій проектування «з нуля» є варіанти декомпозиції за бізнес-можливостями (business capabilities) та за піддоменами (subdomains), які, зокрема, розглядаються у книзі Кріса Річардсона (Chris Richardson) [1, с. 33]. Обидва варіанти передбачають створення компонентів (сервісів) базуючись на ідеях, або смислових складових, що лежать в основі бізнес-логіки, абстрагуючись при цьому від варіанту їх конкретної реалізації. Наприклад, наявність в системі частини, що відповідає за приймання платежів, виноситиметься в окремих сервіс, незалежно від того, які платіжні методи або пеймент-провайдери використовуються в рамках даної загальної складової. Декомпозиція за піддоменами [1, с. 54], що має корні в предметно-орієнтованому проектуванні (domain-driven design, DDD), відрізняється підходом до роботи з моделями (сутностями). Якщо декомпозиція за бізнес-можливостями [1, с. 51], передбачає створення єдиної моделі для кожної бізнес-сутності, що може бути незручно, враховуючи масштаб великих розподілених систем, то декомпозиція за піддоменами передбачає використання проєкції необхідної частини моделі у кожному окремому контексті предметної області.

Марк Річардс (Mark Richards) та Ніл Форд (Neal Ford) розглядають питання гранулярності в контексті декомпозиції за піддоменами, зазначаючи, що не завжди можна легко визначити обсяги та межі того чи іншого сервісу [3, с. 110]. Чайтанья К. Рудрабхатла (Chaitanya K. Rudrabhatla) у своєму дослідженні зазначає, що декомпозиція за бізнес-можливостями може призводити до неефективного дизайну з позиції продуктивності сис-

теми, і пропонує гібридний підхід, який об'єднує переваги декомпозицій за бізнес-можливостями та за піддоменами [4]. Більш детально цей підхід описано в документації Amazon AWS [18] та в роботі колективу авторів (Мухаммад Васім (Muhammad Waseem) та ін.) [19], де він отримав назву декомпозиції за транзакціями. Суть даного патерну в тому, щоб транзакції системи проходили в межах одного сервісу, а не розподілялися між кількома, що дозволяє зменшити час відповіді в системі, покращує доступність (availability) і дозволяє уникнути проблем з узгодженістю даних (data consistency), хоча, з іншого боку, добитися цих характеристик важче, так як декомпована таким чином система починає тяжіти до монолітної структури.

Метод, заснований на генетичному алгоритмі та використанні історій користувачів (user stories), що фокусується на гнучких методологіях розробки, запропонувала група вчених (Фреді Вера-Рівера (Fredy H. Vera-Rivera) та ін.) [5]. Даний метод передбачає завантаження історій користувачів, знаходження між ними залежностей, ідентифікацію сутностей, визначення агрегатів, визначення контекстів та розрахунок метрик. Даний підхід отримав розвиток у роботі [20], де автори додали аналіз семантичної схожості між сутностями сценаріїв користувачів та мікросервісів, метрику когнітивної складності (cognitive complexity metric) для оцінки запропонованих декомпозицій, математичну формалізацію мікросервісних додатків з позиції сценаріїв користувачів та метрик, та оновили генетичний алгоритм.

Варіанти декомпозиції, що базуються на ідентифікації мікросервісів з набору бізнес-процесів, запропоновані у роботах групи вчених (Мохаммед Дауд (Mohamed Daoud) та ін.) [6] та Седігена Хошневіса (Sedigheh Khoshnevis) [7]. У першій роботі запропоновано багатомодельний підхід, у якому розглядаються залежності між бізнес-процесами з певної однієї точки зору (керування, семантики, даних тощо). Результуючі дані кластеризуються для знаходження груп зв'язаних активностей, які можуть стати потенційними мікросервісами [6]. У другій роботі розглядається підхід, який не тільки використовує у якості основи бізнес-процеси, але й застосовує інформацію про хмарних тенантів (cloud tenants), що спеціалізує даний підхід саме в контексті проектування мікросервісів для корпоративних SaaS-додатків, що розгортаються у хмарних середовищах [7].

Наступним варіантом декомпозиції, який підходить для проектування мікросервісів «з нуля»

є спосіб, розглянутий групою вчених (Шаньшань Лі (Shanshan Li) та ін.), заснований на напівавтоматичному підході декомпозиції за діаграмами потоків [8]. Цей патерн являє собою чотирьохетапний процес з проведення аналізу бізнес-вимог та створення специфікацій, побудови детальних діаграм потоків даних для бізнес-логіки та даних, виявлення залежностей між бізнес-логікою та даними, та ідентифікації мікросервісів-кандидатів шляхом кластеризації [8].

Діпалі Баджадж (Deepali Bajaj), Аніта Гоел (Anita Goel) та С. Гупта (S. C. Gupta) у своїй роботі пропонують автоматизований підхід під назвою GreenMicro, в основі якого лежить робота зі сценаріями використання (use cases) та сутностями бази даних (database entities) [9]. Він складається з п'яти етапів: складання матриці відношення сценаріїв використання та сутностей бази даних (Use Case-Database Entities Relationship Matrix), що базується на припущенні, що різний функціонал, який звертається до одних і тих самих даних є пов'язаним між собою; складання матриці відношення сценаріїв використання (Use Case-Use Case Relationship Matrix), що показує ступінь залежності між усіма частинами функціоналу крізь призму понять «включення», «наслідування» та «узагальнення»; складання матриці подібності (Constructing a Resemblance Matrix) для матриці відношення сценаріїв використання та сутностей бази даних, що показує пов'язаність двох одиниць функціоналу з точки зору доступу до даних; створення комбінованої матриці подібності (Combined Similarity Matrix) для сценаріїв використання, що є агрегацією другої та третьої матриць; кластеризації даних четвертої матриці та отримання зв'язаного набору сценаріїв використання (одиниць функціональності), які можуть бути об'єднані в рамках єдиного мікросервісу [9].

З позиції міграції монолітних систем у мікросервісні, в індустрії здебільшого розглядаються патерни, що передбачають поступовий перехід від монолітів до мікросервісів. Одним з таких патернів є додаток-душитель (strangler application), відомий також як фікус-душитель (strangler fig). В його основі лежить процес побудови нової мікросервісної системи навколо старої монолітної, поступово переводячи все більшу кількість функцій в новий додаток, тим самим поступово зводячи старий нанівець. Це досягається організацією шару перехоплювання, який відповідним чином адресує користувачькі запити в ту, чи іншу систему [1, с. 430; 2, с. 79].

Наступний патерн, який використовується при переході від монолітної до мікросервісної архітектури, називається запобіжний шар (anti-corruption layer). Його завданням є перетворення моделей між громіздкою монолітною та контекстно-орієнтованою за принципами DDD, що запобігає проникненню зайвих членів застарілої моделі у нову, а також дозволяє моноліту звертатися до мікросервісу [1, с. 447].

Сем Ньюман (Sam Newman) також розглядає такі патерни, як паралельне виконання (parallel run), що дозволяє одночасно використовувати обидві системи з метою порівняння їх роботи, та вимикачі функціональності (feature toggles), що впроваджує механізм включення та відключення певного функціоналу системи, включення певної реалізації цього функціоналу тощо. Проте, ці патерни можна віднести і до більш загальних випадків застосування, а не лише до декомпозиції [2, с. 80].

Група вчених (Манабу Камімура (Manabu Kamimura) та ін.) розробила метод напівавтоматичного виокремлення сервісів з моноліту на основі методів графової кластеризації та візуалізації [11]. Автоматизація виокремлення сервісів дозволяє зекономити час на кропіткому аналізі вже існуючої системи та отримати результат у графічному вигляді для системи в цілому, не вдаючись до часткового розглядання, яке більше притаманне додатку-душителю. Отримані результати можуть бути використані у поєднанні з іншими патернами [11].

Один із розвитків кластерного підходу запропоновано вченими Мігелем Бріто (Miguel Brito), Хакоме Кунья (Jacome Cunha) та Жоао Сараїва (João Saraiva) [12]. В ньому використовується наступна процедура: виділення лексичної та структурної інформації з вихідного коду моноліту, яка використовується для пошуку тем (topics) та їх розподілу для кожного з компонентів, які потім кластеризуються для виокремлення кандидатів у мікросервіси [12].

Пошуковий підхід на основі багатьох критеріїв запропоновано групою вчених (Луїс Карвальо (Luiz Carvalho) та ін.) [13]. Автори стверджують, що основна маса попередніх підходів базується лише на критеріях зв'язності (coupling) та пов'язаності (cohesion), чого, на їх думку, недостатньо. Вони пропонують підхід, який враховує п'ять факторів: зв'язність, пов'язаність, модульність функціональності (feature modularization), мережеві накладні витрати (network overhead) та повторне використання (reuse). Даний підхід

є графовим, та приймає у якості вхідних параметрів вихідний код успадкованої системи, перелік функціональності та кількість мікросервісів, які необхідно ідентифікувати. Складається граф, кожна вершина якого представляє метод успадкованої системи, призначений її відповідній функції, а кожне ребро містить статичну та динамічну інформацію, що представляє зв'язок між методами – опис передачі даних та виявлені виклики [13].

Метод, що застосовує графову кластеризацію для пошуку залежностей між класами моноліту, запропонували в своїй роботі Омар Аль-Дебагі (Omar Al-Debagy) та Петер Мартінек (Péter Martinek) [14]. Основна ідея методу полягає в тому, щоб, вибравши залежні між собою класи системи, віднайти та згрупувати такі, що мають найсильнішу залежність. Ефективність даного підходу напряму залежить від обраного методу кластеризації, що детально розглядається в роботі вчених [14].

Напівавтоматичний підхід декомпозиції моноліту в безсерверні функції (serverless functions) запропоновано в роботі Лулай Чжу (Lulai Zhu), Даміан Ендрю Тамбуррі (Damian Andrew Tamburri) та Джуліано Казале (Giuliano Casale) [15]. Автоматична частина даного етапу передбачає поступове виокремлення функцій: спочатку відбувається пошук корельованого функціоналу системи на основі API, з виокремленням крупних мікросервісних частин, які потім розбиваються на дрібні функції. Необхідність у ручному втручанні виникає тоді, коли успадкована система написана у форматі архітектури, що застосовує шари. Так як функції є повністю ізольованими одна від іншої, будь-який зв'язок функціональності через шари системи має бути усунутий для фінальної міграції. Даний підхід також може бути використаний як доповнення при міграції монолітної системи у мікросервісну за необхідності виокремлення деякого функціоналу системи в окремі безсерверні функції [15].

Автори підходу GreenMicro Діпалі Баджадж (Deepali Bajaj), Аніта Гоель (Anita Goel) та Суреш Гупта (Suresh Gupta) також запропонували комплексний підхід вилучення мікросервісів, який працює не лише з бізнес-логікою, але й з об'єктами бази даних [10]. Він містить п'ять кроків: статичний аналіз кодової бази для виявлення залежностей між класами та методами; евристичне фільтрування переліки викликів класів та методів, отриманих на попередньому кроці, з метою залишення лише релевантних до основної логіки кла-

сів; ідентифікацію сервісів шляхом формування графу залежностей класів та методів; складання матриці контролю доступу мікросервісів з метою визначення баз даних, якими буде володіти той чи інший сервіс; визначення належності сутностей бази даних тому чи іншому мікросервісу (для чого у даній роботі авторами запропоновано вісім критеріїв) [10].

Аналіз джерел показав, що окрім підходів, які працюють навколо проектною документації (у випадку проектування «з нуля»), або аналізу вихідного коду та пов'язаних з ним артефактів (міграція), для останнього випадку існують платформонезалежні методи та інструменти декомпозиції, що працюють з абстрактною моделлю успадкованої монолітної системи, яка описується набором YAML-файлів. З таких методів декомпозиції варто розглянути Pangaеа [16], та Cromlech [17]. У випадку Pangaеа, на вхід подається модель системи, в яких описано сутності даних та операції, разом з їх характеристиками та взаємозв'язками, а також вхідні параметри декомпозиції, які обумовлюють роботу інструменту. Сам інструмент складається з парсера, вирішувача та візуалізатора. Парсер приймає вхідні дані та перетворює їх на оптимізаційну проблему, що побудована на трьох складових: мінімізації зв'язності, мінімізації накладних витрат на комунікацію та мінімізації накладних витрат реплікації. Вирішувач надає рішення оптимізаційної проблеми – можливе розбиття на мікросервіси. Візуалізатор продукує візуальну репрезентацію запропонованої декомпозиції та надає аналіз витрат, які вона за собою тягне [19]. Інструмент Cromlech побудовано на ідеях Pangaеа, а тому робочий процес має ті самі складові. Але у Pangaеа організаційні аспекти побудовано навколо сутностей баз даних, що не дає повної гарантії розгортання функціональності деякого бізнес-домену на відповідний йому мікросервіс. Натомість, основний фокус роботи Cromlech знаходиться переважно в області операцій, а не даних, а тому мікросервіси, що є результатом роботи даного інструменту мають покращену пов'язність [20].

Висновки. Проаналізувавши наявні на сьогоднішній день дослідження, присвячені декомпозиції предметної області та успадкованих монолітних систем, можна відзначити широкий спектр наявних принципів, підходів та інструментів. Частина з них закріпилася у якості відомих практик в індустрії, проте велика їх кількість все ще залишається відомою, в основному, академічній спільноті, а тому може виявитися

перспективною з точки зору їх широкого застосування у майбутньому. Таким чином, до перспектив подальших досліджень відносимо практичне застосування та отримання зворотного зв'язку від архітекторів та інженерів, які можуть

використати розглянуті методи, інструменти та підходи на практиці, та надати об'єктивні прикладні результати, які допоможуть здійснити широке впровадження найбільш оптимальних інструментів на практиці.

Список літератури:

1. Richardson C. *Microservices patterns: with examples in Java*. Shelter Island, New York: Manning Publications, 2019. 490 p.
2. Newman S. *Building microservices: designing fine-grained systems*. Second Edition. Beijing: O'Reilly Media, 2021. 586 p.
3. Richards M., Ford N. *Fundamentals of software architecture: an engineering approach*. First edition. Beijing Boston Farnham Sebastopol Tokyo: O'Reilly, 2020. 400 p.
4. Rudrabhatla C.K. Impacts of Decomposition Techniques on Performance and Latency of Microservices // *IJACSA*. 2020. Vol. 11, № 8.
5. Vera-Rivera F.H. et al. *Microservices Backlog – A Model of Granularity Specification and Microservice Identification // Services Computing – SCC 2020 / ed. Wang Q. et al. Cham: Springer International Publishing, 2020. Vol. 12409. P. 85–102.*
6. Daoud M. et al. *Towards an Automatic Identification of Microservices from Business Processes // 2020 IEEE 29th International Conference on Enabling Technologies: Infrastructure for Collaborative Enterprises (WETICE)*. Bayonne, France: IEEE, 2020. P. 42–47.
7. Khoshnevis S. *A search-based identification of variable microservices for enterprise SaaS // Front. Comput. Sci.* 2023. Vol. 17, № 3. P. 173208.
8. Li S. et al. *A dataflow-driven approach to identifying microservices from monolithic applications // Journal of Systems and Software*. 2019. Vol. 157. P. 110380.
9. Bajaj D., Goel A., Gupta S.C. *GreenMicro: Identifying Microservices From Use Cases in Greenfield Development // IEEE Access*. 2022. Vol. 10. P. 67008–67018.
10. Bajaj D., Goel A., Gupta S. *A Comprehensive Microservice Extraction Approach Integrating Business Functions and Database Entities // IAJIT*. 2024. Vol. 21, № 1.
11. Kamimura M. et al. *Extracting Candidates of Microservices from Monolithic Application Code // 2018 25th Asia-Pacific Software Engineering Conference (APSEC)*. Nara, Japan: IEEE, 2018. P. 571–580.
12. Brito M., Cunha J., Saraiva J. *Identification of microservices from monolithic applications through topic modelling // Proceedings of the 36th Annual ACM Symposium on Applied Computing*. Virtual Event Republic of Korea: ACM, 2021. P. 1409–1418.
13. Carvalho L. et al. *Search-based many-criteria identification of microservices from legacy systems // Proceedings of the 2020 Genetic and Evolutionary Computation Conference Companion*. Cancún Mexico: ACM, 2020. P. 305–306.
14. Al-Debagy O., Martinek P. *Dependencies-based microservices decomposition method // International Journal of Computers and Applications*. 2022. Vol. 44, № 9. P. 814–821.
15. Zhu L., Tamburri D.A., Casale G. *RADF: Architecture decomposition for function as a service // Softw Pract Exp*. 2023. P. spe.3276.
16. Staffa S. et al. *Pangaea: Semi-automated Monolith Decomposition into Microservices // Service-Oriented Computing / ed. Hacid H. et al. Cham: Springer International Publishing, 2021. Vol. 13121. P. 830–838.*
17. Quattrocchi G. et al. *Cromlech: Semi-Automated Monolith Decomposition Into Microservices // IEEE Trans. Serv. Comput.* 2024. P. 1–16.
18. Ward T., Gulin D. *AWS Prescriptive Guidance – Decomposing monoliths into microservices*. Amazon Web Services, Inc., 2024.
19. Waseem M. et al. *Decision Models for Selecting Patterns and Strategies in Microservices Systems and their Evaluation by Practitioners: arXiv:2201.05825*. arXiv, 2022.
20. Vera-Rivera F.H. et al. *Microservices Backlog – A Genetic Programming Technique for Identification and Evaluation of Microservices From User Stories // IEEE Access*. 2021. Vol. 9. P. 117178–117203.

Beirak D.Ya., Vakaliuk T.A. APPROACHES TO THE DOMAIN DECOMPOSITION OF MICROSERVICE SYSTEMS IN THE SCIENTIFIC LITERATURE

Currently, the issue of building microservice systems, which is complex and manifold, continues to actualize. Microservice architecture allows for designing systems with low coupling, which, owing to the possibility of horizontal scaling and because of smaller separate services, are easier to understand and make changes to

compared to big complex monoliths, improves such architecture parameters as scalability, maintainability, efficiency, etc. These and other reasons shape industry specialists' choice that are making it in favor of this kind of architecture more and more frequently and are moving towards migrating existing legacy monoliths to microservices. One important problem that engineers and architects who choose the microservice architecture face is the decomposition of the domain for greenfield projects or the existing monolith decomposition for brownfield cases. Being that the quality of decomposition has a great initial impact on further development of the system, the necessity of choosing the appropriate methods and tools for performing this task arises. In this article, the greenfield and brownfield decomposition methods and tools are examined. For each of these aspects, both approaches and patterns established in the industry, and methods and tools found primarily in scientific studies are covered. Aside from categorizing methods into green and brownfield, the approaches and instruments covered in this article can be nominally divided into manual, semi-automatic, and automatic. Furthermore, the methods and tools covered are based on various decomposition approaches, the adaptation of metrics, usage of user stories, use cases, and flow diagrams, adaptation of clusterization and graph analysis, data and related functionality analysis, etc.

Key words: *microservice architecture, decomposition, modeling, migration, patterns.*

Беляков Р.О.

Військовий інститут телекомунікацій та інформатизації імені Героїв Крут

МЕТОДИКА СИНТЕЗУ ТОПОЛОГІЇ НАЗЕМНО-ПОВІТРЯНОЇ КОМУНІКАЦІЙНОЇ МЕРЕЖІ СПЕЦІАЛЬНОГО ПРИЗНАЧЕННЯ

Стаття присвячена розробці методики синтезу топології наземно-повітряної комунікаційної мережі спеціального призначення. Управління мережами класу MANET є складним завданням через їх 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 зростаючої актуальності вимоги із децентралізації управління. Наукова новизна запропонованого алгоритму методики полягає у впровадженні алгоритмів екстремального машинного навчання типу AOS-ELM для формування субоптимальних та оптимальних управляючих рішень для реалізації вузлових та мережевих цілей на основі прогнозування векторів станів мобільних комунікаційних вузлів на виконання користувальницьких вимог із забезпечення якості інформаційного обміну.

Проведено формалізацію процесу формування управляючих рішень в ієрархічній моделі управління наземно-повітряною мережею з акцентом на формування бази знань станів мобільних комунікаційних вузлів та мережі в цілому. Визначено, що параметрами керування в процесі управління наземно-повітряною комунікаційною мережею є складові управляючі структури мережі (ступінь зв'язності, взаємне розташування вузлів, дальності радіодоступу, види модуляції, технології розширення спектру, методи маршрутизації, методи управління діаграмою направленості та ін.). Зроблено висновок, що для реалізації стратегії управління необхідно визначити закономірності станів мобільних вузлів з урахуванням динаміки (фізичної – швидкість, прискорення, зони функціонування, та комунікаційної – навантаження, пропускна спроможність та ін.) їх взаємодії та визначення типу управляючого впливу, що доцільно дослідити експериментальним шляхом і визначено напрямком подальших досліджень.

Використання такого підходу може забезпечити ефективне управління мережею, адаптуючись до змін у середовищі та враховуючи цільові функції вузлового та мережевого рівня в режимі часу близького до реального.

Ключові слова: комунікаційна мережа, MANET, FANET, система інтелектуального управління, нейромережі, екстремальне машинне навчання, прогнозування, оцінка параметрів, вагові коефіцієнти.

Постановка проблеми. Управління сучасними комунікаційними мережами класу MANET є складним завданням через їхню динамічну природу, високу мобільність вузлів, обмежені ресурси, та проблеми інтеграції повітряних комунікаційних мереж [1], що є часто є єдино-можливим рішенням для влаштування інтервалів ретрансляції радіосигналів, особливо в умовах ведення бойових дій, або влаштування пошуково-рятувальних операцій.

Крім того, однією із вимог щодо забезпечення інформаційного обміну є зменшення рівня централізованого контролю, що ускладнює процес влаштування кібератак [2] і вимагає розробки моделей, методів, методик, алгоритмів для підвищення ефективності мобільних комунікаційних мереж спеціального призначення.

Для побудови систем управління мереж такого класу необхідно забезпечити комплексне представлення математичної моделі процесу

формування управлінських рішень, що з максимальним охопленням описує процес інформаційного обміну мобільних комунікаційних вузлів як наземної так і повітряної мережі, і описуватиме умови та середовище функціонування. 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 наземно-повітряними комунікаційними мережами, які активно використовуються, однак математично не описані, або описані фрагментарно.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Моделювання децентралізованих комунікаційних мереж є предметом досліджень низки науковців, зокрема авторів наукових праць [1-10]. В статті [1] обговорюється проблема інтеграції повітряних комунікаційних мереж класу FANET для її

застосування у якості повітряної підмережі на комунікаційних аероплатформах з метою ретрансляції радіосигналів та забезпечення інформаційного обміну із заданим рівнем. В [2] зосереджена увага на аспекти кібербезпеки сучасного інфопростору, та визначено, що децентралізація мереж є одним із шляхів боротьби із кібератаками. В науковій праці [3] описано процес управління топологією за синтезованими правилами, отриманими експериментальним шляхом та описано процес прийняття рішення із ітеративного пошуку оптимальної топології мобільної радіомережі. В [4] показано модель прийняття рішень по управлінню повітряною мережею, а в [5] розкрито цільові функції цього процесу. В статті [6] показано модель мобільності наземної комунікаційної мережі, для формування статистичної вибірки метрик переміщення мобільних комунікаційних вузлів на етапі планування. В науковій праці [7] розкрито методику управління позиціонуванням повітряною комунікаційною мережею в умовах впливу навмисних завад. В статті [8, 9] показано ієрархічний принцип побудови мобільних радіомереж наземної компоненти. В статті [9] розкрито процес інтелектуального управління вузловими ресурсами наземної комунікаційної мережі, а в [10] – повітряної.

Таким чином, оптимізація процесів інформаційного обміну в мобільних наземно-повітряних комунікаційних мережах є логічним продовженням вирішення наукової проблеми розробки нового науково-методичного апарату управління наземно-повітряними мережами для забезпечення заданої якості інформаційного обміну з урахуванням наявних вузлових та мережевих ресурсів і є перспективним напрямком наукових досліджень.

Постановка завдання. Метою роботи є розробка методики синтезу топології наземно-повітряної комунікаційної мережі спеціального призначення.

Наукова новизна запропонованого алгоритму методики полягає у впровадженні алгоритмів екстремального машинного навчання типу AOS-ELM для формування субоптимальних та оптимальних управляючих рішень для реалізації вузлових та мережевих цілей на основі прогнозування векторів станів мобільних комунікаційних вузлів на виконання користувальницьких вимог із забезпечення якості інформаційного обміну.

Проведено формалізацію процесу формування управляючих рішень в ієрархічній моделі управління наземно-повітряною мережею з акцентом

на формування бази знань станів мобільних комунікаційних вузлів та мережі в цілому.

Виклад основного матеріалу. Вихідні умови функціонування мережі. Перспективна наземно-повітряна комунікаційна мобільна мережа (НПМ) спеціального призначення розмірністю до сотні наземних мобільних комунікаційних вузлів – наземна комунікаційна мережа (НКМ), та до десяти комунікаційних аероплатформ (КА) об'єднаних у повітряну комунікаційну мережу (ПКМ), зони та граничні значення фізичних характеристик функціонування мобільних користувачів (МК) попередньо відомі, та опрацьовані на етапі планування [3]. Наземні комунікаційні вузли можуть бути виконані на засобах рухомості або у вигляді переносних SDR радіостанцій. У складі НКМ функціонують мобільні базові станції (МБС), що виконують завдання центру управління НКМ (ЦУМ), та управління ПКМ.

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.

Параметри комунікаційної мережі: мережа представляється направленим графом $G^\psi = (V^\psi, E^\psi)$, із множиною вершин $V^\psi = \{\mathcal{G}_i\}$ і множиною ребер $E^\psi = \{(i, j) | d_{ij} \leq r_i \wedge d_{ij} \leq r_j\}$, $i, j = \overline{1, N_\psi}$, $i \neq j$, $\psi = \overline{1, 3}$ (1- НКМ, 2 – мережа МБС, 3 – ПКМ). N_ψ – загальна кількість комунікаційних вузлів ψ -го рівня, d_{ij} – відстань між вузлами, $r_i(p_i^\psi)$ – радіус (потужність) передачі $i, j = \overline{1, N_\psi}$, $i \neq j$, $\psi = \overline{1, 3}$. У якості системи управління НПМ прийнято складну ієрархічну інтелектуальну систему управління, що умовно розподілена на три основні рівні управління: виконавчий, вузловий та мережевий, та складається із q -ої кількості підсистем (підсистема управління маршрутизацією, топологією, навантаженням, безпекою, QoS, польотом (переміщенням МБС), радіоресурсом, витратами енергоресурсом).

Параметри вузла: кожен вузол графу \mathcal{G}_i^ψ , в деякий момент часу t , описується сукупністю параметрів: координатами розташування (x_i, y_i, z_i) ; швидкістю переміщення представлена через вектор швидкості в точці $\vec{v}(t) = (v_x(t), v_y(t), v_z(t))$ у момент часу t ; вектором прискорення $\vec{a}(t) = (a_x(t), a_y(t), a_z(t))$; напрямком переміщення $\vec{d}(t) = \frac{\vec{v}(t)}{|\vec{v}(t)|}$, де $|\vec{v}(t)| = \sqrt{(v_x(t))^2 + v_y(t)^2 + v_z(t)^2}$;

потужністю передавача що може змінюватись адаптивно $p_i^w(t) \leq p_{max}$; ємністю в кожен момент часу t , що не може бути вищою за деяке максимальне значення $e_{\sigma_i}(t) \leq e_{\sigma_{imax}}$; \sim_i – шириною діаграми направленості антени i -го вузла; маршрутною таблицею найкоротших шляхів $L_i = L_{\eta}(\pi_{ij}^k)$, де $\eta = \bar{1}, H$ – метрики маршрутної таблиці (наявність радіозв'язності, пропускна спроможність, затримка передачі, потужність передачі, евклідова відстань та ін.), $\pi_{ij}^k = \{0, 1\}$ – маршрутна змінна, що визначає наявність маршруту від відправника до адресата через сусідній вузол. Інтенсивність вхідних потоків визначається матрицею

тяжіння $\Gamma = \gamma_{jk}, \sum_{j=1}^{N_{\psi}} \sum_{k=1}^{N_{\psi}} \gamma_{jk} \leq \gamma_{max}, j \neq k$; пропускна

спроможність радіоканалу $s_{ij} \leq s_{ijmax}, \forall (i, j) \in E^{\psi}$;

$\Pi_{\xi_{ij}}$ – пріоритет ξ -го типу трафіка $\xi = \bar{1}, 3$, (1 – відео, 2 – голос, 3 – дані) в каналі ij ; приймач кожного мобільного вузла характеризується порогом чутливості $p_{пч}$, яка визначає мінімальну потужність сигналу $p_{min}^w(t)$, який може бути прийнятий вузлом. У складі кожного мобільного вузла функціонує інтелектуальна система управління, основним завданням якої є ініціалізація векторів власного стану $X_{1qr}(k) = \{x_{1qr}^a(k)\}_{a=1}^{a_{1qr}}$ – для НКВ, $X_{KAlqr}(k) = \{x_{KAlqr}^a(k)\}_{a=1}^{a_{1qr}}$ – для КА.

Допущення та обмеження: $N_{НПМ} \leq 100$, місцевість функціонування НПМ – $MAP_{НПМ}$ визначена завчасно (фізичні перешкоди та рельєф місцевості відомі); вузли НКМ розподілені за рангами $P_i^{HM}, i = \bar{1}, 7$, кожен ранг при цьому має свою обмежену ділянку функціонування на початковому етапі, потім розташування вузлів НКМ може змінюватись випадковим чином в межах $MAP_{НПМ}$, та займати на деякий час іншу ділянку функціонування, кожен вузол оснащений SDR радіостанціями із технологією MIMO. Безпілотні літальні апарати повинні виконувати польотне завдання за відсутності візуального спостереження власними силами (засобами).

Необхідно: розробити методику управління топологією наземно-повітряної комунікаційної мережі спеціального призначення, що з урахуванням ситуації $X^w(t)$, що склалася в КМ (чи її зоні ψ – го рівня), дозволить прийняти такі управлінські рішення $W^*(t) = \{Y_{2q}\}, q = \bar{1}, Q$ двох основних класів задач реалізації цілей управління Ψ^w (управління переміщенням та/або польотом – $U_{nep}(t)$, та управління комунікаційними параметрами – $U_{ком}(t)$) на фізичному $W_{физ}(t)$, $W_{кан}(t)$ та мережевому $W_{мер}(t)$ рівнях моделі OSI, які відповідатимуть системній цільовій функції

$$W^*(t) = \arg \underset{W_{физ}, W_{кан}, W_{мер}(t) \in \mathbb{C}^w}{opt} \Psi^w(X^w(t), W_{физ}, W_{кан}, W_{мер}(t)), \quad (1)$$

$$\text{де } \Psi^w = \{U_{nep}(t); U_{ком}(t)\}, \quad (2)$$

$$X^w(t) = \{\tilde{X}_{1q}, \tilde{X}_{KAlq}, \widehat{X}_{1q}(k+1), \widehat{X}_{KAlq}(k+1), \tilde{X}_2, Z_{1q}(k), Z_{1qKa}(k)\}, \quad (3)$$

і дозволять забезпечити виконання цільової структури управління НПМ (або ψ -ої підмережі) мобільних комунікаційних вузлів та забезпечити задану якість інформаційного обміну ζ -го типу трафіка при виконанні обмежень на множині управляючих рішень та ресурси мобільних комунікаційних вузлів:

$$\Omega: \left\{ \begin{array}{l} t_3 \leq t_{здоп} (l_{\eta}(\pi_{ij}^k) \leq l_{\etaдоп}), \\ g_{ij} \leq s_{ijmax}, \\ r_i \leq r_{imax} (p_i \leq p_{imax}), \\ p_{пч_i} \leq p_{ij}(t), \\ e_{\sigma_i}(t) \leq e_{\sigma_{imax}} \end{array} \right\}, \quad (4)$$

де $W_{физ}, W_{кан}, W_{мер}(t)$ – множини оптимальних (субоптимальних) управляючих рішень вузлової СУ на фізичному, каналному та мережевому рівні моделі OSI, відповідно, щодо реалізації управління переміщенням та комунікаційною складовою.

Методологія дослідження. Цикл управління топологією наземно-повітряної комунікаційної мережі включає наступні етапи [4]:

- збір інформації про стан та параметри функціонування мережі або її зони та розрахунок та оцінка характеристик мережі (зони);
- знаходження нової топології мережі (у випадку відхилення параметрів функціонування від допустимих значень, що реалізує ціль управління вузла і доведення до вузлів прийнятого рішення).

Класифікація стратегій управління вузловими та користувальницькими цільовими функціями показано на рисунку 1. На рисунку здійснено декомпозицію процесу управління, базисним завданням якого є формування управляючого впливу деякого виду, або його їх системної дії. На рисунку 2 введено наступні умовні позначення:

$J_{ij} = 1$ – радіозв'язність між вузлами i та j ($i, j \in N_{\psi}, i \neq j$);

$\max s(m_{ab})$ – функція максимуму пропускної спроможності маршруту між вузлами a та b ($a, b \in N_{\psi}, a \neq b$);

$\min t_s(m_{ab})$ – функція мінімуму часу затримки маршруту між вузлами a та b ($a, b \in N_{\psi}, a \neq b$);

$\min p(m_{ab})$ – функція мінімуму витрат по потужності на маршруті між вузлами a та b ($a, b \in N_{\psi}, a \neq b$);



Рис. 1. Схема вибору стратегії формування управляючих рішень наземно-повітряної комунікаційної мережі

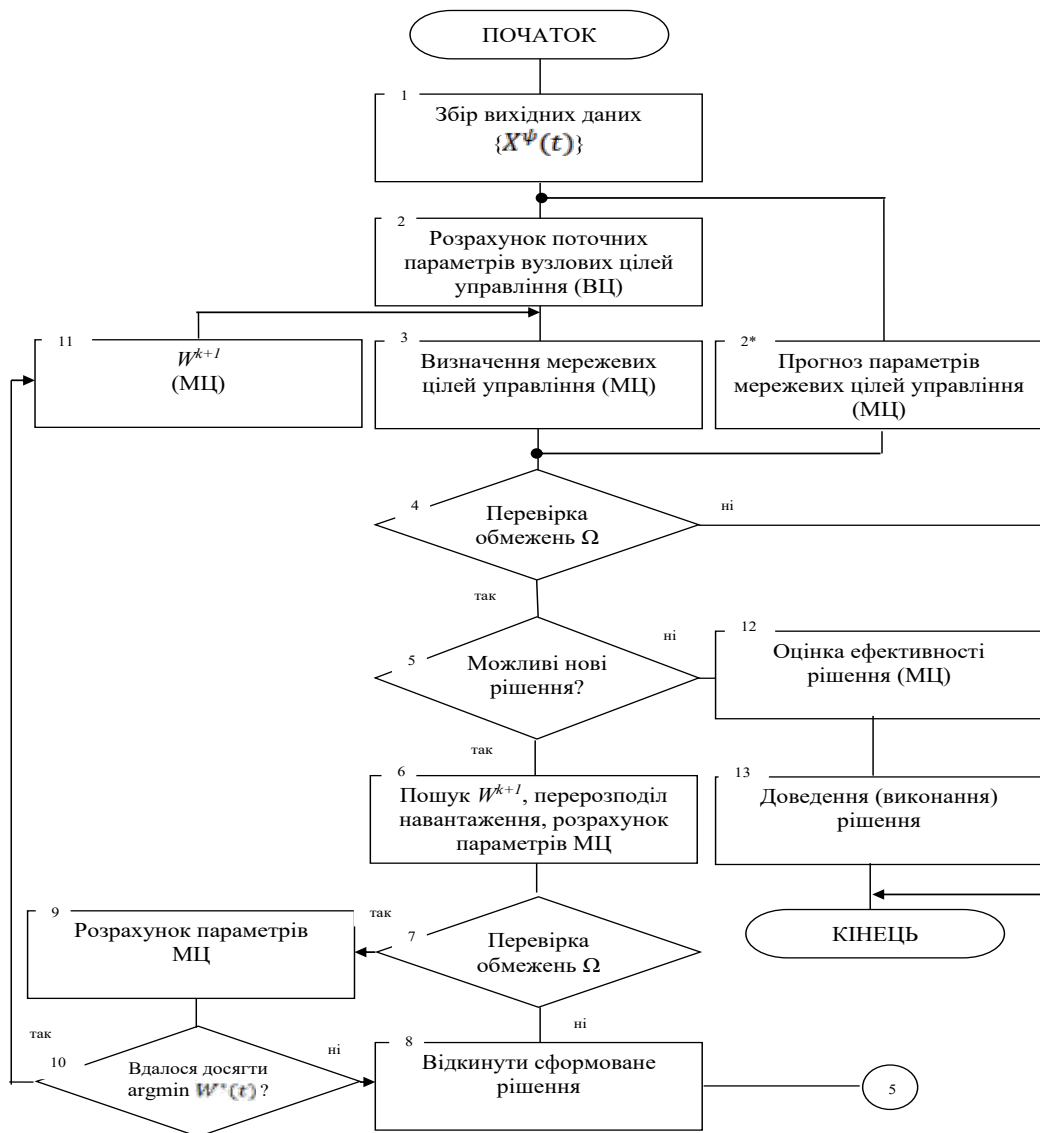


Рис. 2. Алгоритм управління топологією НПМ

$S_{\max} = \max_{s \in S} S(s)$ – функція максимуму пропускної спроможності мережі;

$\bar{t}_{\min} = \left(\frac{1}{|M|} \right) \min_{m_{ab} \in M} \sum t_z(m_{ab})$ – функція мінімуму

середнього часу затримки мережі, M – множина маршрутів мережі;

$\min_{m \in M} \bar{P}(m_{ab})$ – функція мінімуму середньої витрати по потужності мережі, M – множина маршрутів мережі;

$\min_{E_i \in E} \bar{E}$ – функція мінімуму середньої витрати енергії i -ої кількості вузлів мережі.

Алгоритм управління топологією НІМ складається із наступних кроків:

1. Збір інформації про стан мережі та введення початкових (вихідних) даних (блок 1):

N_{ψ} – загальна кількість комунікаційних вузлів ψ – го рівня, $\psi = 1, 3$ (1- НКМ, 2 – мережа МБС, 3 – ПКМ).

координати вузлів в тривимірному просторі, закони зміни їх швидкості від мінімального до максимального, прискорення та напрямку, зони переміщення (згідно рангів) [3, 5, 6];

діапазон зміни радіусу радіодоступності (в залежності від потужності обладнання, режимів роботи, виду модуляції);

коефіцієнт направленості антени;
енергія батарей, початкової маршрутно-таблиці найкоротших шляхів, отриманої зі статистичної вибірки на етапі планування [3];

інтенсивність потоків пакетів;
протоколу доступу до каналу;
визначених мобільним користувачем допустимих (мінімально необхідних) значень параметрів Ω (вузлові цілі – блок 2).

2. Визначення (розрахунок) відповідності параметрів мережевих цілей управління, тобто розрахунок вихідної топології (блок 3) та перевірка відповідності обмеженням (блок 4), що здійснюється швидше за рахунок паралельного процесу прогнозування МЦ (блок 2*). При виконанні всіх вимог – закінчити алгоритм (блок 12, 13) – перебудова топології не потрібна.

3. Аналіз можливості отримання нової топології (блок 5). Якщо рішення існує, перейти до кроку 4, інакше – оцінити ефективність отриманого рішення, довести його до вузлів та закінчити алгоритм (блок 12, 13).

4. Пошук «допустимої» топології (блок 6–11). Пошук нового рішення W^{k+1} ; побудова маршрутних таблиць, що визначається матрицею навантаження та прийнятим протоколом маршрути-

зації; перерозподіл потоків згідно маршрутних таблиць; розрахунок МЦ для утворених маршрутів мережі; перевірка виконання обмежень МЦ для оновленої топології; якщо $W^{k+1} \leq \operatorname{argmin} W^*(t)$ (субоптимальна умова), то відкинути рішення, інакше – прийняти рішення W^{k+1} та перейти до кроку 3 (блок 5).

В статті [4, 7] в контексті визначених управлінських вузлових параметрів розглядається потужність передачі та/або направленість антени. Крім того, з позиції управління топологією задача пошуку матриці зв'язності $W^*(t)$ відноситься до класу NP-повних.

У контексті управління топологією мережі, задача пошуку оптимальної матриці зв'язності $W^*(t)$ (1) може включати в себе визначення таких параметрів, як мінімальна вартість зв'язку між вузлами, максимальна пропускна спроможність, мінімізація затримок, забезпечення надійності зв'язку та інші. Це може включати рішення оптимізаційних задач, які можуть бути NP-складними через велику кількість можливих конфігурацій та необхідність врахування багатьох обмежень.

Однак, варто зазначити, що конкретна складність задачі залежить від її точної формулювання та обмежень, які на неї накладаються. У деяких випадках, застосування евристичних алгоритмів або алгоритмів наближеного рішення, машинного навчання може дозволити ефективно знаходити прийнятні рішення для задач управління топологією, навіть якщо вони теоретично відносяться до класу NP-повних.

Тому, для скорочення перебору можливих топологій, в статті [3] пропонується використовувати множину правил, об'єднаних в базу знань, що змінюють зв'язність мережі для покращення її параметрів, при чому критерієм визначення моменту перебудови топології мережі є невиконання однієї з умов обмежень (4).

В контексті отримання рішення системою управління із використанням алгоритмів машинного навчання [11] використання бази знань пропонується здійснювати за загальною схемою, що показана на рисунку 2.

Схема (рис. 2) представляє структуру взаємодії між різними компонентами ієрархічної моделі управління наземно-повітряною комунікаційною мережею, що включає процеси:

– аналіз стану мережі – збір та аналіз даних про поточний стан мережі відбувається як для наземних комунікаційних вузлів (НКВ), так і для повітряних комунікаційних аероплатформ (КА);

– прогноз стану вузлів та мережі – на основі отриманої та обробленої інформації форму-

ється прогноз майбутнього стану НКВ, КА та мережі;

– формування рішень – на основі прогнозованого стану мережі формуються управлінські рішення, що спрямовані на оптимізацію роботи мережі та покращення комунікації;

– поповнення бази знань – для систем управління кожного НКВ та КА існують бази знань, які містять статистичні дані та використовуються для аналізу стану мережі та прогнозування станів (реалізації вузлових та мережевих цілей).

Бази знань містять актуальну інформацію, яка використовується для виявлення тенденцій та закономірностей у поведінці вузлів (реакції на управляючі впливи в умовах середовища). Аналіз стану мережі із має на меті зібрати докладну інформацію про поточний стан мережі, в тому числі про її топологію, наявність та стан маршрутів, рівень сигналу, перешкоди тощо. Прогнозування стану мережі необхідне для передбачення змін у мережі та планування відповідних дій для підтримки ефективної роботи мережі, та зменшення часу формування управляючих рішень – оптимальної стратегії управління для оптимізації вузлового та мереже-

вого ресурсу та покращення якості інформаційного обміну. В контексті управління – мобільна базова станція виконує задачі центру управління мережею, та формує управляючі впливи $\{Y_{2q}\}, q = \overline{1, Q}$ – множина векторів управління мережею. На рисунку 3 використано наступні умовні позначення:

$X_{1qr}(k)$ – множина векторів стану q -го інтелектуального агента НКВ, де $X_{1qr}(k) = \{x_{1qr}^a(k)\}, a = 1, 2, \dots, a_{1qr}$;

$\tilde{X}_{1q}(k)$ – множина узагальнених векторів оцінок стану q -ї підсистеми першого рівня, де $\tilde{X}_{1q}(k) = \{\tilde{x}_{1q}^a(k)\}, a = 1, 2, \dots, a_{1q}$;

$U_{1qr}(k)$ – множина векторів управління q -ї підсистеми першого рівня, які спрямовані r -му ІА нульового рівня, де $U_{1qr}(k) = \{u_{1qr}^b(k)\}, b = 1, 2, \dots, b_{1qr}$;

$Y_{1q}(k)$ – множина векторів управління q -ї підсистеми першого рівня, які надсилаються підсистемі управління верхнього рівня (вузлу-координатору), де $Y_{1q}(k) = \{y_{1q}^d(k)\}, d = 1, 2, \dots, d_{1q}$;

$Z_{1q}(k)$ – множина векторів оцінок стану q -ї підсистеми першого рівня, які надсилаються підсистемі управління верхнього рівня (вузлу-координатору), де $Z_{1q}(k) = \{z_{1q}^d(k)\}, d = 1, 2, \dots, d_{1q}$.

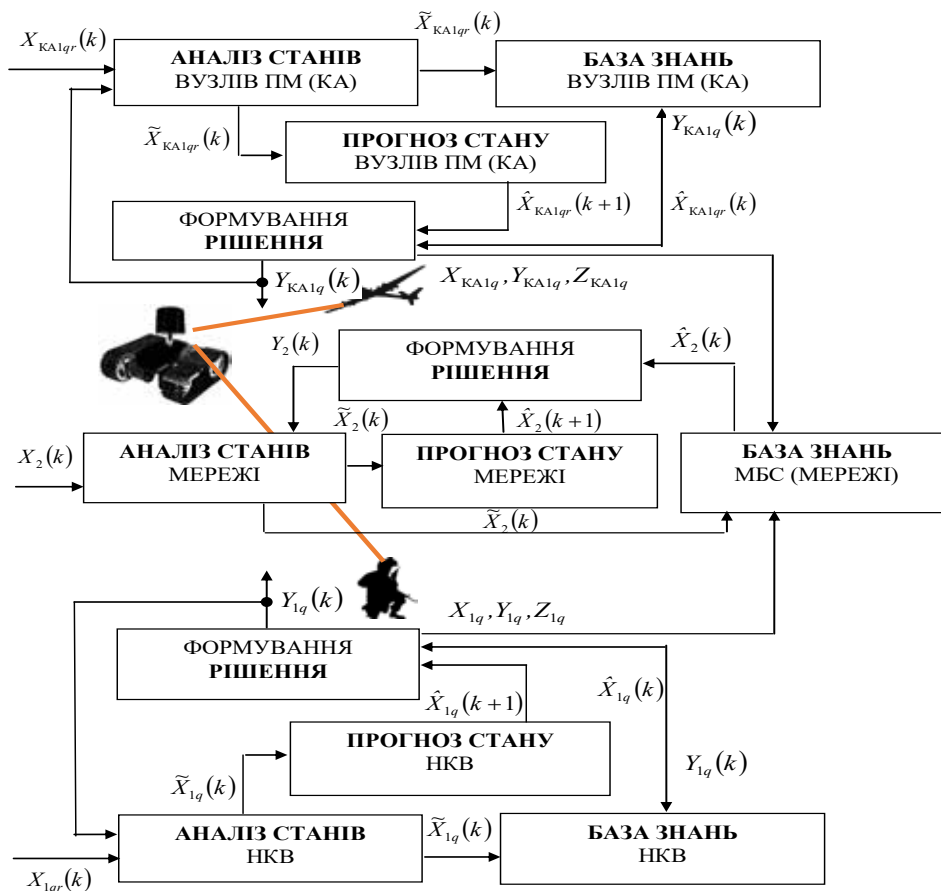


Рис. 3. Схема процесу формування управляючих рішень наземно-повітряної комунікаційної мережі

Для q -ї підсистеми управління КА на першому рівні:

$X_{KA1qr}(k)$ – множина векторів стану q -го інтелектуального агента КА, де $X_{KA1qr}(k) = \{x_{KA1qr}^a(k)\}, a = 1, 2, \dots, a_{1qr};$

$\widetilde{X}_{KA1q}(k)$ – множина узагальнених векторів оцінок стану q -ї підсистеми КА першого рівня, де

$\widetilde{X}_{KA1q}(k) = \{\widetilde{x}_{KA1q}^a(k)\}, a = 1, 2, \dots, a_{1q};$

$U_{KA1qr}(k)$ – множина векторів управління q -ї підсистеми КА першого рівня, які спрямовані r -му ІА КА нульового рівня, де $U_{KA1qr}(k) = \{u_{KA1qr}^b(k)\}, b = 1, 2, \dots, b_{1qr};$

$Y_{KA1q}(k)$ – множина векторів управління q -ї підсистеми КА першого рівня, які надсилаються підсистемі управління верхнього рівня (вузлу-координатору КА), де $Y_{KA1q}(k) = \{y_{KA1q}^d(k)\}, d = 1, 2, \dots, d_{1q};$

$Z_{KA1q}(k)$ – множина векторів оцінок стану q -ї підсистеми КА першого рівня, які надсилаються підсистемі управління верхнього рівня (вузлу-координатору КА), де $Z_{KA1q}(k) = \{z_{KA1q}^d(k)\}, d = 1, 2, \dots, d_{1q}.$

У статті [11] 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 станів

комунікаційних вузлів в нестационарних динамічних умовах, та зменшує вплив архаїчних і надмірних даних в процесі навчання в реальному часі за рахунок механізмів забування та фільтрації [11].

Тому, прийнято рішення, для реалізації процесу формування управляючих рішень вузлового рівня застосувати нейромережевий алгоритм AOS-ELM.

Висновки. У статті представлено методику синтезу топології наземно-повітряної комунікаційної мережі спеціального призначення, здійснено формалізований опис алгоритму формування управляючих рішень починаючи від субоптимального.

Визначальною особливістю застосування запропонованої методики є процес формування стратегії управління, що визначає структуру вузлових та мережевих цілей, визначає управляючий параметр та уточнює параметри керування.

Встановлено, що представлення системи управління наземно-повітряної комунікаційної мережі у вигляді ієрархічної моделі дозволяє здійснити декомпозицію задач управління вузловими та мережевими ресурсами в складних динамічних умовах.

Напрямок подальших досліджень є оцінка ефективності запропонованої методики, та визначення класу нейромережевих алгоритмів для його застосування в процесі управління мережевим ресурсом.

Список літератури:

1. Беляков Р. Проблема інтеграції повітряної мережі класу FANET в мобільну комунікаційну мережу спеціального призначення. *Computer-integrated technologies: education, science, production*. 2023. № 53. С. 263–276. URL: <https://doi.org/10.36910/6775-2524-0560-2023-53-40> (дата звернення: 26.03.2024).
2. Roy Y., Mazur N., Riabchun O. Strategy of determination of the hypothetic direction of increasing the risk of inflammation of the infrastructure safety. *Cybersecurity: education, science, technique*. 2019. No. 3. P. 97–103. URL: <https://doi.org/10.28925/10.28925/2663-4023.2019.3.97103> (date of access: 26.03.2024).
3. Міночкін А. І., Романюк В. А. Управління топологією мобільної радіомережі. *Зв'язок*. 2003. № 2. С. 28–33.
4. Романюк В. А., Степаненко Є. О. Модель прийняття рішень по управлінню повітряною мережею. *Збірник наукових праць ВІПІ*. 2019. № 3. С. 84–95.
5. 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> (date of access: 26.03.2024).
6. Беляков Р., Фесенко О. 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> (дата звернення: 26.03.2024).
7. Methodology positional controlling of communications aerial platform in FANET in the minds of infiltration of radio electronic countermeasures / R. Bieliakov et al. *Communication, informatization and cybersecurity systems and technologies*. 2023. No. 4. P. 5–15. URL: <https://doi.org/10.58254/viti.4.2023.01.05> (date of access: 26.03.2024).
8. Сова О. Я., Міночкін Д. А., Ошурко В. М. Ієрархічна модель взаємодії інтелектуальних агентів у системах управління мобільними радіомережами класу MANET. *Збірник матеріалів Міжнародної науково-технічної конференції «ПЕРСПЕКТИВИ ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙ»*. 2015. С. 15–17.

9. Координація цільових функцій інтелектуальних систем управління тактичними радіомережами класу MANET / О. Я. Сова та ін. *Збірник наукових праць ВІТІ ДУТ*. 2014. № 4. С. 31–40.

10. Беляков Р., Фесенко О. Модель інтелектуального управління ресурсами наземної комунікаційної мережі класу MANET. *INFORMATION TECHNOLOGY AND SOCIETY*. 2023. № 3 (9). С. 6–14. URL: <https://doi.org/10.32689/maup.it.2023.3.1> (дата звернення: 20.03.2024).

11. Bieliakov R. O., Fesenko O. D. Improved model of intelligent management of node resources of the terrestrial communication network of the MANET class. *Scientific notes of Taurida National V.I. Vernadsky University. Series: Technical Sciences*. 2023. No. 5. P. 93–98. URL: <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2023.5/16> (date of access: 25.03.2024).

Bieliakov R.O. METHODOLOGY FOR SYNTHESIZING THE TOPOLOGY OF A SPECIAL-PURPOSE GROUND-AIR COMMUNICATION NETWORK

The article focuses on developing a methodology for synthesizing the topology of a specialized ground-air communication network. Managing MANET class networks presents a complex challenge due to their dynamic nature, high mobility of nodes, and limited resources including battery power and the technical specifications of communication devices. Additionally, it encompasses managing protocols across different OSI model layers and the necessity for implementing control functions at both node and network levels amid increasing demands for decentralized management. The scientific novelty of the proposed method algorithm lies in employing extreme learning machine algorithms of the AOS-ELM type for generating suboptimal and optimal control decisions to achieve node and network objectives based on predicting the state vectors of mobile communication nodes, thus meeting user requirements for quality of information exchange.

The process of making control decisions in the hierarchical model of ground-air network management was formalized with a focus on creating a knowledge base of the states of mobile communication nodes and the network as a whole. It was determined that the control parameters in managing the ground-air communication network include the components of the network's control structure (connectivity degree, mutual node positioning, radio access ranges, modulation types, spectrum spreading technologies, routing methods, and directional control techniques, etc.). It was concluded that implementing the management strategy necessitates identifying the regularities in the states of mobile nodes, considering the dynamics (physical – speed, acceleration, functioning zones; and communication – load, throughput, etc.) of their interaction and determining the type of control influence, which is expedient to investigate experimentally and will guide further research direction.

Such an approach could provide effective network management by adapting to environmental changes and considering the objective functions at the node and network levels in near-real time.

Key words: communication network, MANET, FANET, intelligent control system, neural networks, extreme machine learning, forecasting, parameter estimation, weight coefficients.

Бугаєва Л.М.

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

Абрамова А.О.

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

Крамаренко Д.П.

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

КОМП'ЮТЕРНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСУ ВИРОБНИЦТВА БІОДИЗЕЛЯ У МІКРОРЕАКТОРІ

У статті проведено дослідження виробництва біодизельного палива, як альтернативного джерела енергії, з використанням мікрореакторів у якості заміни традиційним реакторам. Розглянуто загальні відомості про біодизельне паливо та встановлено, що біодизельне паливо має значно менші викиди, ніж дизель на нафтовій основі. Показано переваги та недоліки біодизельного палива порівняно із вичопним паливом. Розглянуто такі методи отримання біодизеля: процес розведення рослинних і відпрацьованих олій, процес трансестерифікації, надкритичний метод. Проведено аналізування існуючих різновидів мікрореакторів, які мають багато практичних і експлуатаційних переваг перед звичайними реакторами. Мікрореакторам приписують значний потенціал для підвищення виробництва біодизеля завдяки їх кращій масо- та теплопередачі, меншому часу перебування, зменшеній кількості реагентів, каталізаторів і відходів, легкій і компактній конструкції системи, ламінарному потоку, ефективному змішуванню, кращому керуванню процесом, низькому споживанню енергії тощо. На основі проведеного аналізу визначено, що для процесу синтезу біодизеля ефективним може бути метод трансестерифікації з використанням основного каталізатора NaOH, де в якості сировини обрано використану олію. Запропоновано схему виробничого процесу біодизеля в мікрореакторі. Побудовано кінетичні моделі синтезу біодизеля з відпрацьованої олії в мікрореакторі на основі моделі отримання біодизеля запропонованої Фріманом для реакції трансестерифікації. Масопередачу розраховують за плівковою моделлю з урахуванням особливостей реакційної системи. На основі запропонованих кінетичних моделей математичну модель представлено у вигляді системи диференціальних рівнянь. Запропонована модель розв'язана методом Рунге-Кутта. Отримано результати розв'язку у графічному вигляді, що відображають зміни концентрації вихідних речовин та продуктів у часі. Для спрощення процедури розрахунку за математичною моделлю розроблено програмний модуль на мові програмування C# в середовищі Visual Studio. Результати розрахунків одержують у табличному та графічному вигляді.

Ключові слова: біодизельне паливо, відпрацьована олія, мікрореактор, технологія трансестерифікації, математична модель, програма розрахунку.

Постановка проблеми. Однією з глобальних проблем є виснаження запасів вичопного палива. Вичопне паливо, як і раніше, є основним джерелом енергії для людства. За даними Міжнародного енергетичного агентства, попит на паливо постійно зростає і в найближчі 25 років може подвоїтися. За останні кілька років ціни на вичопне паливо значно зросли через високий попит на бензин і дизельне паливо. Ще одна глобальна проблема, з якою стикається людство – це глобальне потепління, що є результатом спалю-

вання вичопного палива і величезних викидів вуглекислого газу. Вичопне паливо також вважається одним з основних джерел забруднення довкілля. Тому людству необхідно шукати і створювати альтернативні джерела енергії, засновані на екологічно безпечних процесах. Одним з альтернативних джерел енергії є біодизель. Як відомо, біодизель – це алкілові моноєфіри жирних кислот рослинних олій і тваринних жирів. За своїми властивостями біодизель схожий з дизельним паливом і тому може використовуватися в дизель-

них двигунах. Порівняно з дизельним паливом біодизель є гарною альтернативою викопному паливу, оскільки не містить ароматичних речовин, сірки, чадного газу, вуглеводнів і твердих частинок у вихлопних газах. Біодизель виробляють із різних рослинних олій і тваринних жирів шляхом реакції переестерифікації в реакторах із мішалкою. Однак цей процес вирізняється високими експлуатаційними витратами та низькою продуктивністю, тому його необхідно модернізувати. Одним зі способів підвищення ефективності виробництва біодизеля є використання мікрореакторів замість звичайних реакторів. Порівняно зі звичайними реакторами мікрореактори мають значні переваги, такі як високі швидкості тепло- і масообміну, можливість швидко регулювати виробничу потужність і значно нижчу вартість. Тому дослідження виробництва біодизеля в мікрореакторі з використанням комп'ютерного моделювання є цілком **актуальним**.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Біодизель – це суміш довголанцюгових моноалкільних ефірів жирних кислот. Біодизель нетоксичний, біологічно розкладається та відновлюється, виробляється з органічної та відновлюваної сировини. Склад, основні характеристики та властивості біодизеля значно кращі порівняно із дизельним паливом [1, 2]. Основними перевагами біодизеля перед викопними видами палива є те, що він виробляється з відновлюваних ресурсів та його можна використовувати з невеликими змінами або взагалі без них в існуючих дизельних двигунах. Це означає, що він може бути альтернативою викопному паливу та ефективним джерелом енергії для транспорту [2]. Чистий біодизель або біодизель, змішаний з нафтовим дизельним паливом, практично не містить сірки і може використовуватися для поліпшення змащування двигуна і продовження терміну його служби [3]. Біодизель виділяє менше парникових газів. При спалюванні викопного палива в атмосферу виділяється вуглекислий газ та інші парникові гази, які підвищують температуру і спричиняють глобальне потепління. Експерти вважають, що заміна бензину на біодизель може скоротити викиди парникових газів на 78% [2, 3]. Викопні види палива є обмеженими і не можуть задовольнити потреби людства у вугіллі, нафті та природному газі протягом певного періоду часу. Біодизель може зменшити залежність від іноземних постачальників нафти, кожна країна зможе виробляти власне паливо [4]. Ще однією перевагою біодизеля є те що, він

біорозкладний та нетоксичний. При спалюванні біопалива виділяється значно менше вуглецю і утворюється менше забруднюючих речовин. Порівняно з нафтовим дизельним паливом, біодизель виробляє менше сажі (твердих частинок), оксиду вуглецю, незгорілих вуглеводнів та діоксиду сірки [3]. Біодизель є менш легкозаймистим порівняно із нафтовим дизельним паливом, тому є більш безпечний у використанні, зберіганні та транспортуванні [4].

До недоліків використання біодизеля відносять більшу витрату палива через нижчу теплотворну здатність, підвищені викиди оксиду азоту порівняно із дизпаливом, складність використання при низьких температурах, через недовговічну стабільність біопаливо не придатне для довготривалого зберігання [2]. При використанні суміші біодизеля із дизпаливом перерахованих недоліків можна позбутися.

Методи виробництва біодизеля залежать від типу сировини та каталізаторів (наприклад, гідроксид натрію, гідроксид калію, сірчана кислота, іонообмінні смоли та ліпаза). У методі розведення рослинна олія або відпрацьоване масло змішується за встановленою пропорцією з розчинником або дизпаливом, що знижує в'язкість олії та зменшує кількість дизельного палива, що використовується [5]. Такий тип змішування призводить до покращення якості пального та зменшення споживання викопного палива. Цей метод можна вважати найбільш прийнятним способом використання альтернативних видів палива [6]. Найпоширеніший метод виробництва біодизеля заснований на процесі трансестерифікації для зменшення в'язкості олії [7]. У цьому методі гліцерин повинен бути видалений і замінений спиртом. В якості каталізаторів використовуються кислоти, гомогенні або гетерогенні кислотні каталізатори, кількість і тип яких залежить від кількості жирних кислот у вихідній олії [8]. Інший метод виробництва заснований на підході з використанням надкритичних рідин. Критична точка – це найвища температура і тиск, при яких речовина може існувати в рівновазі у вигляді пари і рідини [7]. Інший напрямок розвитку методів виробництва біодизеля – комплексний вплив різних факторів на складні ефіри гліцерину та вищих карбонових кислот.

Для підвищення ефективності виробництва біодизеля натомість стандартних реакторів використовують. Мікрореактори – це мініатюрні реакційні системи, виготовлені з використанням

мікротехнологій. Чим менший розмір реакційної системи, тим краще прискорення реакції, присутня мінімізація обмежень тепло- і масообміну, які є проблематичними у звичайних реакційних системах [9]. Мікрореактори виготовляються за принципом ієрархії. В залежності від типу процесу мікрореактори можна класифікувати, як запропоновано в [10]:

1. Каталітичні та некаталітичні реакційні мікрореактори. Конструкція мікрореакторів відрізняється залежно від наявності та типу каталізатора. В одних системах каталізатор покриває стінки мікроканалу, в інших – використовується у вигляді порошку або взагалі відсутній.

2. Мікрореактори для гомогенних і гетерогенних процесів. Установки для гомогенних процесів забезпечують краще змішування компонентів, а установки для гетерогенних процесів забезпечують необхідні міжфазні поверхні.

3. Мікрореактори для окремих систем, наприклад, газ-рідина, рідина-рідина, газ-повітря, фотохімічні реакції. Реактори можуть бути розроблені для конкретних типів систем, щоб забезпечити максимальну інтенсивність процесу.

Мікрореактори можуть працювати безперервно або періодично.

Мікрореактори мають ряд практичних та експлуатаційних переваг над звичайними реакторами. Через менший розмір замкнутої системи, пов'язані з нею градієнти заданого параметра (тиск, температура і концентрація) процесу є більшими. Менший лінійний розмір системи збільшує масообмін, теплообмін на одиницю площі поверхні. Сучасні мікрореактори мають мікроканали шириною від 50 до 500 мкм, що дозволяє зменшити товщину стінки між реакційним і теплообмінним каналами до діапазону 20–50 мкм, збільшуючи таким чином коефіцієнт тепловіддачі [10]. Завдяки зменшенню лінійних розмірів мікроканалів збільшується відношення поверхні до об'єму. Крім зазначених вище переваг у теплообміні, збільшена площа поверхні пристрою може бути використана для інтенсифікації процесу, наприклад, в каталітичних газофазних реакторах, де внутрішня поверхня пристрою покрита активним матеріалом [9, 10]. Ще однією перевагою мікрореакторів є висока гідродинаміка потоку, що є важливою характеристикою мікрорідин, при цьому багатофазні потоки зазвичай демонструють добре розділення фаз [9, 10]. Характерною особливістю мікрореакторів є багаторазове дублювання основних складових мікро-

реакторів, їх можна експлуатувати, підключаючи послідовно або паралельно до загальної труби подачі, що використовується для виробництва, це підвищує продуктивність [10]. Така побудова елементів мікрореакторів дозволяє легко переобладнати установку для проведення декількох реакцій та синтезу різних продуктів. Такі системи можуть працювати в широкому діапазоні робочих умов [9]. Таким чином, порівняно зі звичайними реакторами, мікрореактори мають великий потенціал у виробництві дизельного палива.

Метою статті є комп'ютерне моделювання процесу виробництва біодизеля в мікрореакторі на базі розробленої математичної моделі мікрореактору, що розглядає кінетику процесу отримання біодизеля з використаної олії, і відповідної її реалізації у вигляді програмного комплексу.

У відповідності до поставленої мети у роботі представлено рішення авторами таких задач:

– провести аналізування процесів виробництва біодизеля з використаної олії та побудувати технологічну схему для отримання його в мікрореакторі;

– побудувати математичну модель одержання біодизеля;

– реалізувати програмно запропоновану математичну модель.

Об'єктом дослідження є мікрореактор синтезу біодизеля. Предметом дослідження є технологія процесу виробництва біодизеля в мікрореакторі.

Виклад основного матеріалу.

Технологічна схема виробництва біодизеля в мікрореакторі представлена на рис. 1.

Для очищення використаної олії від твердих частинок та інших домішок олію з ємності зберігання 1 подають у фільтр 3. В теплообміннику 4 олія нагрівається до 60°C. В змішувачі 5 спирт та каталізатор попередньо змішують при температурі 50°C. В мікрореактор 9 надходить суміш олії та метанолу з каталізатором. При температурі 65°C в мікрореакторі проходить реакція трансестерифікації. З мікрореактора 10 охолоджений до 45°C продукт надходить у відстійник 11. Готовий продукт (біодизель) одержується у верхній секції відстійника 12, а з нижньої секції – гліцерин [11–13].

Біодизель є сумішшю метилових ефірів низьких і високих жирних кислот, одержаний в результаті реакції трансестерифікації біологічних вихідних речовин з триацилгліцеридами. У промисловості біодизель отримують в результаті реакцією каталітичного метанолізу або етанолізу рослинних

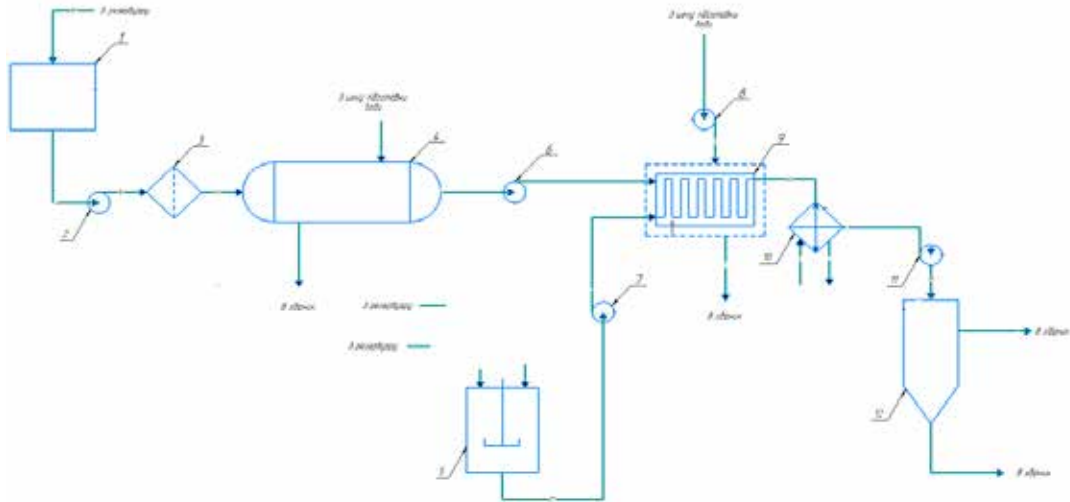
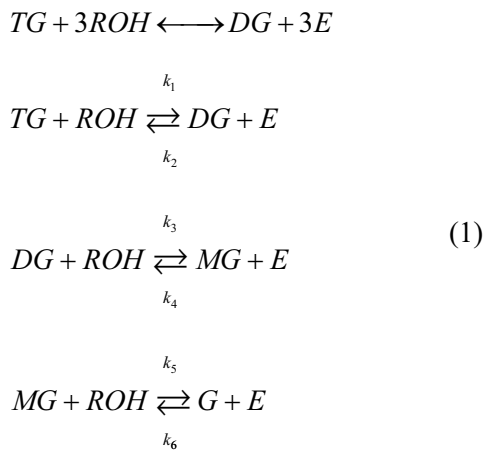


Рис. 1. Технологічна схема виробництва біодизеля

1 – ємність для олій; 2, 6, 7, 8, 11 – насоси; 3 – фільтр; 4 – теплообмінник; 5 – змішувач; 9 – мікрореактор; 10 – охолоджувач; 12 – відстійник

олій, у якості каталізаторів застосовують гідроксид натрію або гідроксид калію [14, 15].

Реакція трансестерифікації має вигляд (1) [14]:



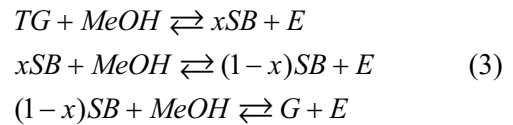
де $k_1, k_2, k_3, k_4, k_5, k_6$ – константи швидкості реакції.

Триацилгліцериди (TG) реагують зі спиртом (ROH) в результаті чого одержують діацилгліцерид (DG) та складний ефір жирної кислоти (E). На другій та третій стадіях діацилгліцерид перетворюється на моноацилгліцерид (MG), і далі в гліцерин (G) та ефір жирної кислоти (E) [14].

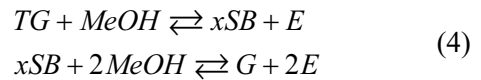
З використанням плівкової моделі розраховується масопередача. Для ідентифікації моно- та дигліцеридів вводиться псевдо-побічний продукт (SB) у вигляді суми DG і MG .

$$x = \frac{DG}{DG + MG}
 \tag{2}$$

Тоді, реакція метанолізу набуде виду (3):



Після спрощення:



При побудові моделі прийнято такі допущення: температура стала 65°C , реакція йде у дві фази з хімічною рівновагою, загальна швидкість потоку є незмінною [15, 16].

Рівняння швидкості реакції (5):

$$\begin{aligned}
 r_1 &= k_1 \cdot [TG]^p [MeOH] [MeO^-] \\
 r_2 &= k_2 \cdot x \cdot [SB]^p [E]^p [MeO^-] = k_2^* \cdot [SB]^p [E]^p [MeO^-] \\
 r_3 &= k_3 \cdot x \cdot [SB]^p [MeOH]^p [MeO^-] = k_3^* \cdot [SB]^p [MeOH]^p [MeO^-] \\
 r_4 &= k_4 \cdot [TG]^p [E]^p [MeO^-]
 \end{aligned}
 \tag{5}$$

Рівняння для триацилгліцеридів TG , побічного продукту SB , ефіру жирних кислот E мають вигляд (6) [14, 15]:

$$\begin{aligned}
 J_T^p &= \beta_T \left([T]^a - [T]^p \right) \\
 J_{SB}^p &= \beta_{SB} \left([SB]^a - [SB]^p \right) \\
 J_E^p &= \beta_E \left([E]^a - [E]^p \right)
 \end{aligned}
 \tag{6}$$

де β_i – коефіцієнт масоперееносу i -го компонента, p – компоненти у полярній фазі, a – компоненти у неполярній фазі.

Кінетичні рівняння процесу отримання біодизеля представлено у вигляді системи диференціальних рівнянь [14, 15]:

$$\begin{cases}
 \frac{d[TG]^p}{dt} = J_{TG}^p - r_1 + r_2 \\
 \frac{d[TG]^a}{dt} = -J_{TG}^p \\
 \frac{d[SB]^p}{dt} = J_{SB}^p + r_1 - r_2 - r_3 + r_4 \\
 \frac{d[SB]^a}{dt} = -J_{SB}^p \\
 \frac{d[G]}{dt} = r_3 - r_4 \\
 \frac{d[MeOH]}{dt} = -r_1 + r_2 - 2r_3 + r_4 \\
 \frac{d[E]^p}{dt} = J_E^p + r_1 - r_2 + 2r_3 - r_4 \\
 \frac{d[E]^a}{dt} = -J_E^p \\
 [MeO^-] = \frac{[MeO^-]_0 [MeOH]_0}{[MeOH]}
 \end{cases} \quad (7)$$

Початкові концентрації компонентів:
 $[TG]_0 = 1.057$ моль / л, $[MeOH]_0 = 16.72$ моль / л,

$[MeO^-]_0 = 0.442$ моль / л. Вихідні концентрації продуктів реакції дорівнюють нулю [14, 15].

Розв'язання (7) здійснюється із використанням методу Рунге-Кутта.

Отримані результати представлено на рис. 2.

З графіку видно, що досліджуваних параметр моделі (концентрація) продуктів реакції виходить на сталий рівень при температурі 20 С.

Для автоматизації розрахунків виконано програмну реалізацію запропонованої моделі процесу отримання біодизелю на мові програмування С# в середовищі Visual Studio. Програма має зручний інтерфейс. Головне вікно містить дві вкладки «Трансестерифікація рослинної олії», «Вирішення математичної моделі». Перша вкладка містить 5 секцій: реакція синтезу, введення вихідних даних, введення коефіцієнтів швидкості реакції, введення часу реакції та отриманий результат розрахунків.

Для отримання результатів користувачу потрібно ввести вихідні дані та обрати кнопку «Розрахувати». Результати можна отримати у табличному та графічному вигляді із можливістю збереження у файлі Excel.

Висновки. У статті досліджено найпоширеніші методи виробництва біодизельного палива.

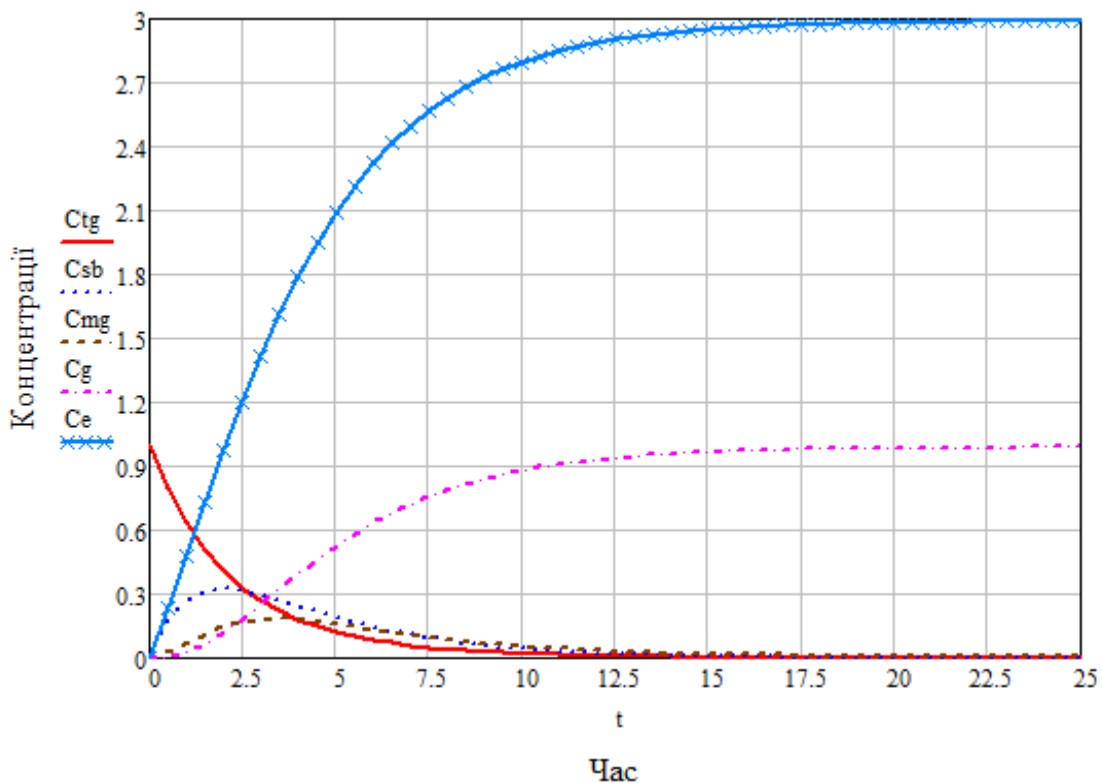


Рис. 2. Графічне представлення зміни концентрацій вихідних речовин та продуктів у часі

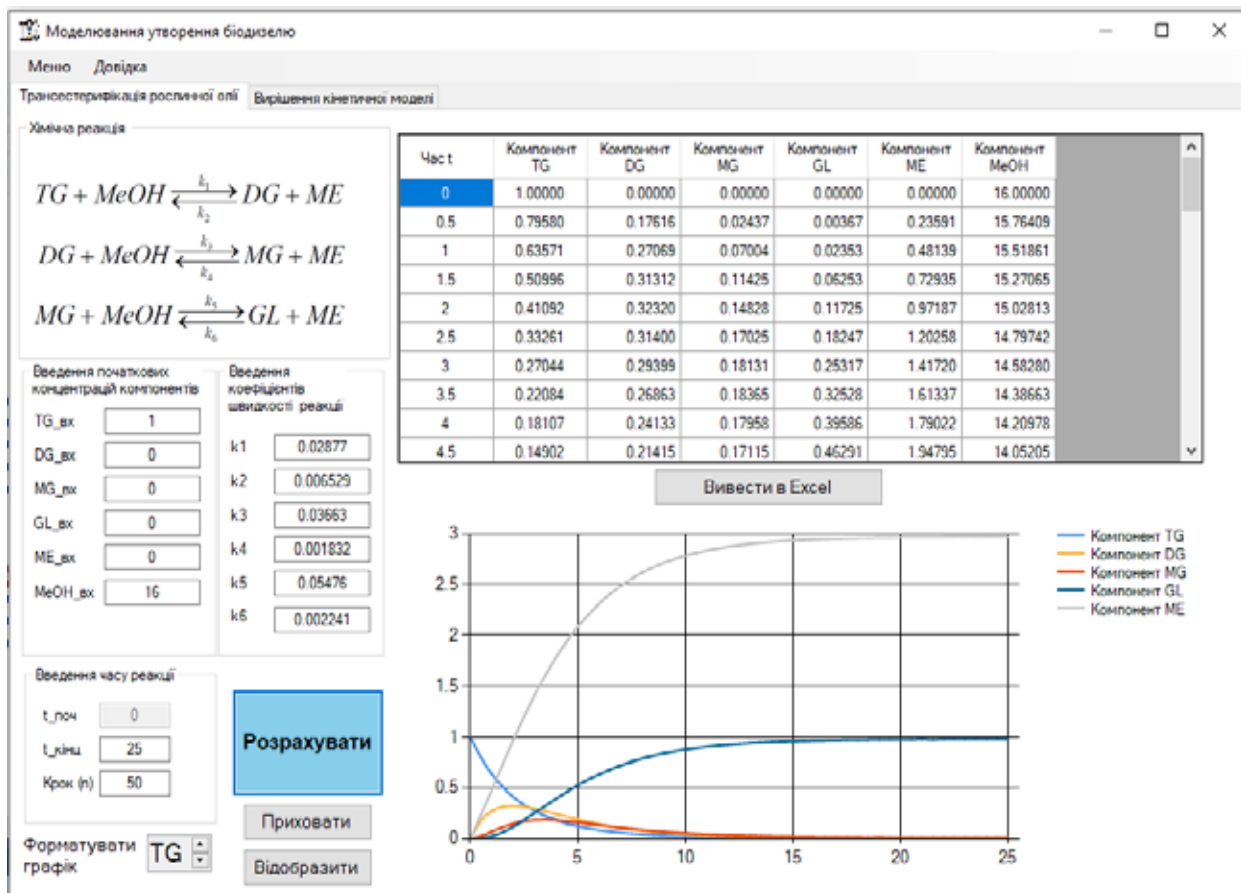


Рис. 3. Головне вікно програми

Встановлено переваги та недоліки використання біодизельного палива порівняно із дизельним паливом. Проаналізовано специфіку побудови та застосування мікрореакторів у виробництві біодизельного палива. При дослідженні процесу виробництва біодизельного палива встановлені основні параметри для одержання високоякісного продукту. Запропоновано математичну модель синтезу біодизеля в мікрореакторі, що вирішу-

валась на основі методу Рунге-Кутта. Результати отримано у вигляді зміни концентрацій триацилгліцерину, гліцерину та метилових ефірів від часу. Розроблено програму для комп'ютерного моделювання мікрореактора синтезу біодизельного палива. Проведено комп'ютерні експерименти з використанням розробленої програми та порівняно результати моделювання з даними існуючих технологічних процесів виробництва біодизеля.

Список літератури:

1. Raw material for biodiesel production. Valorization of used edible oil. *Revue des Energies Renouvelables* Vol. 17 N°2 (2014). pp. 335–343 URL: https://www.cder.dz/download/Art17-2_14.pdf
2. Chapter 2. Introduction to Biodiesel Production URL: https://www.canr.msu.edu/uploads/files/biodiesel_production.pdf
3. Biodiesel Basics. URL: <https://www.biodiesel.org/what-is-biodiesel/biodiesel-basics>
4. What is Biodiesel URL: https://www.conserve-energy-future.com/advantages_disadvantages_biodiesel.php
5. Maximino Manzanera, Maria L. Molina-Muñoz, Jesús González-López. Biodiesel: An Alternative Fuel. *Recent Patents on Biotechnology*. 2008. 2. pp. 25–34.
6. Kuchkina Anna Yu., Sushchika Nadezhda N. Feedstocks. Methods and Perspectives of Biodiesel Production. *Journal of Siberian Federal University. Biology* 1 (2014). pp. 14–42. URL: <https://core.ac.uk/download/pdf/38643652.pdf>
7. Ezgi Sühel AKTAŞ, Özlem DEMİR, Deniz UÇAR. A review of the biodiesel sources and production methods. *International Journal of Energy and Smart Grid* Vol 5, Number 1, 2020. URL: <https://dergipark.org.tr>

8. Rajalingam A., Jani S. P., Senthil Kumar A., Khan Adam M. Production methods of biodiesel: *Journal of Chemical and Pharmaceutical Research*, 2016. 8(3). pp. 170–173. URL: https://www.researchgate.net/publication/306140139_Production_methods_of_biodiesel

9. Anita Šalić, Bruno Zelić. MICROREACTORS – PORTABLE FACTORIES FOR BIODIESEL FUEL PRODUCTION. *Mikroreaktori – prenosiva postrojenja goriva i maziva*, 50, 2013. pp. 85–110, URL: <https://core.ac.uk/download/pdf/14439677.pdf>

10. Borovinskaya E. S., Reshetilovskii V. P. Microstructural Reactors: Concept, Development and Application. *Journal of Applied Chemistry*, 2008. pp.2211–2231.

11. Крамаренко Д. П., Бугаєва Л. М. Аналіз процесу отримання біодизельного палива // Матеріали ІХ Міжнародної науково-практичної конференції молодих учених, аспірантів і студентів (АКІТ – 2023) ; Київ, КПІ ім. Ігоря Сікорського, 19 квітня 2023 р. – С. 67–68.

12. Gnanaprakasam A., Sivakumar V. M., Surendhar A., Thirumarimurugan M., Kannadasan T. Recent Strategy of Biodiesel Production from Waste Cooking Oil and Process Influencing Parameters: A Review. *Hindawi Publishing Corporation Journal of Energy*, 2013, 10 pages. URL: <http://dx.doi.org/10.1155/2013/926392>

13. Akkarawatkhoosith N., Srichai A., Kaewchada A., Ngamcharussrivichai C., Jaree A. Evaluation on safety and energy requirement of biodiesel production: conventional system and microreactors. *Process Safety and Environmental*. 2019 p. URL: <https://doi.org/10.1016/j.psep.2019.10.018>

14. Schwarz Stefan, Borovinskaya EkaterinaS., Reschetilowski Wladimir. Base catalyzed ethanolysis of soy bean oil in microreactors: Experiments and kinetic modeling. *Chemical Engineering Science*. 104. 2013. pp.610–618.

15. Richard R., Thiebaud-Roux S., Prat L. Modelling the kinetics of transesterification reaction of sunflower oil with ethanol in microreactors. *Chemical Engineering Science*. 87. 2013. pp.258–269.

Bugaieva L.M., Abramova A.O., Kramarenko D.P. COMPUTER SIMULATION OF THE PROCESS OF BIODIESEL PRODUCTION IN A MICRO-REACTOR

The article researches the production of biodiesel as an alternative source of energy using microreactors as a replacement for traditional reactors. General information about biodiesel fuel is considered and it is found that biodiesel fuel has significantly lower emissions than petroleum-based diesel. The advantages and disadvantages of biodiesel compared to fossil fuels are clarified. The following methods of biodiesel production are considered: the process of diluting vegetable and waste oils, the process of transesterification and the supercritical method. An analysis of the existing varieties of microreactors, which have many practical and operational advantages over conventional reactors, has been carried out. Microreactors are credited with significant potential to increase biodiesel production due to their better mass and heat transfer, shorter residence time, reduced amount of reactants, catalysts and waste, lightweight and compact system design, laminar flow, efficient mixing, better process control, low energy consumption, etc. On the of the analysis, it was determined that the method of transesterification using the main catalyst NaOH, where the used oil was chosen as a raw material, can be effective for the process of biodiesel synthesis. A scheme of the biodiesel production process in a microreactor is proposed. Kinetic models of biodiesel synthesis from waste oil in a microreactor are constructed on the basis of the biodiesel production model proposed by Freeman for the transesterification reaction. Mass transfer is calculated according to the film model, taking into account the characteristics of the reaction system. Based on the proposed kinetic models, the mathematical model is presented in the form of a system of differential equations. The proposed model is solved by the Runge-Kutta method. The results of the solution were obtained in graphic form, reflecting changes in the concentration of substances over time. To simplify the calculation procedure based on the mathematical model, a program module was developed in the C# programming language Visual Studio. The results of calculations are obtained in tabular and graphical form.

Key words: biodiesel fuel, waste oil, microreactor, transesterification technology, mathematical model, calculation program.

Василенко В.М.

Національний авіаційний університет

Карпенко М.І.

Національний університет харчових технологій

Скибінський А.С.

Національний авіаційний університет

Гуйда О.Г.

Таврійський національний університет імені В.І. Вернадського

АНАЛІЗ ПЕРЕВАГ ТА ОБМЕЖЕНЬ LOW-CODE ПЛАТФОРМ НА ПРИКЛАДІ WEBFLOW.COM

Стаття присвячена дослідженню актуального питання переваг та недоліків використання no-code платформ для створення веб-ресурсів, з фокусом на аналізі low-code рішень, зокрема використання конструктора веб-сайтів Webflow. Мета дослідження полягає у виявленні оптимальних підходів до розробки веб-сайтів та їхнього порівняння. Для досягнення цієї мети було використано різні методи аналізу та синтезу, зокрема, проведено літературний аналіз для вивчення сучасних підходів до розробки веб-сайтів та виокремлення їх основних переваг та недоліків. В результаті цього було розглянуто ключові характеристики різних методів розробки, а також описано їхні можливості та обмеження. Особливу увагу приділено створенню веб-сайту кафедри комп'ютерних технологій дизайну і графіки Національного авіаційного університету з використанням технології Responsive Web Design (RWD) та конструктора Webflow. Веб-сайт розроблено з урахуванням потреб користувачів. Забезпечено гармонійний вигляд продукту та його коректну роботу на різних платформах. З'ясовано, що як low-code, так і no-code платформи мають свої унікальні переваги, що робить їх привабливими для різних видів користувачів. Low-code платформи, наприклад Webflow, забезпечують більшу гнучкість та можливість редагування коду, що приводить до менших обмежень у функціоналі та дизайні веб-сайту. Отримані результати мають велике практичне значення для розробки та вдосконалення веб-сайтів та мобільних додатків. Вони сприятимуть полегшенню доступу до інформації для користувачів та покращенню комунікації між вчителями та студентами. Дана робота може послужити цінним джерелом для фахівців у сфері освіти та розробки програмного забезпечення, які прагнуть використовувати мобільні технології для покращення навчального процесу.

Ключові слова: *Responsive Web Design (RWD), Progressive Web Apps (PWA), low-code, web design, web development.*

Постановка проблеми. На момент сьогодні майже кожна компанія має власний веб сайт. Особливу увагу сайтам приділяють організації, які надають послуги через інтернет. E-Commerce (електронна комерція) стала однією з найуспішніших бізнес-ідей за останні роки. Раніше управління веб-сайтом електронної комерції було складним завданням, але завдяки прогресу технологій тепер можливо успішно керувати веб-сайтом, вибравши правильну платформу для розгортання. Загалом існує лише два типи програмного забезпечення: власне та з відкритим кодом (open source). Відомі компанії віддають перевагу розробці власного продукту, буде це орієнтована на споживача

продукція чи власний веб сайт. Підприємства, які хочуть залишатися конкурентоспроможними, повинні забезпечувати клієнтів зручним способом покупок на різних пристроях з різними операційними системами. Даний спосіб має задовольняти споживачів та оброблювати замовлення з максимальною швидкістю та ефективністю. Усі ці переваги (а саме мультиплатформність, високий рівень безпеки, швидкодія) може надати розробка власного коду: власне ПЗ – це програмне забезпечення, яке належить особі чи фірмі, яка його створила та опублікувала. Лише розробники програмного забезпечення мають доступ до вихідного коду, а це означає, що лише вони знають, як він працює,

і можуть вносити в нього зміни та поширювати його. З іншого боку не кожен бізнес може собі дозволити створення власного веб сайту, купівлю чи аренду доменного імені, чи підключення бази даних. Для рішення цих проблем існують платформи-конструктори з відкритим кодом. Дані платформи на кшталт Webflow, Weblum, Shopify, BigCommerce, WordPress, Weebly, Squarespace дають змогу власними силами не лише створити веб сайт, але й розмістити його в мережі. Такі сервіси мають різний рівень оволодіння ними, але це потужний засіб, який на порядок зменшує час розробки та впровадження застосунку, при цьому ним можна користуватися не маючи навичок дизайнера чи програміста. Наша задача полягає в аналізі переваг та обмежень low-code платформ з no-code конструкторами та класичним програмуванням веб сторінок за допомогою HTML, CSS, JavaScript на прикладі створеного сайту кафедри комп'ютерних технологій дизайну і графіки Національного авіаційного університету за допомогою сервісу webflow.com.

Аналіз попередніх досліджень і публікацій. Для досягнення цієї мети, було проведено детальний огляд періодичних наукових видань, вийшли за останні 5–10 років. Основні результати аналізу попередніх досліджень включають: Аналіз та порівняння власного ПЗ та з відкритим кодом праці «An Analysis and Comparison of Proprietary and Open-Source Software for Building E-commerce Website: A Case Study» [1] стало підґрунтям для опрацювання матеріалів. У процесі літературного огляду виникли питання щодо доцільності no-code конструкторів. Праця «Closing the Gap Between Designers and Developers in a Low-Code Ecosystem» [2] доводить результатами дослідження на професійних дизайнерах, що при використанні технологій перетворення UX/UI інтерфейсу у веб-технологію з низьким кодом, використовуючи методи трансформації моделі та метамодельювання, підвищує ефективність роботи над проектом на 20–75%. І як наслідок, постала потреба в даних щодо ефективності, які вирішили матеріали статті «The performance of Webflow: a comparative study» [3], де виміряно продуктивність Webflow, порівняно її з Wordpress, а аналіз ефективності здійснювався за допомогою автоматизованого аудиту ефективності за допомогою Google Lighthouse і його 6 показників ефективності. Результати показали, що в той час як Wordpress перевершив Webflow за більшістю окремих показників продуктивності в обох експериментах, Webflow загалом показав кращі

результати на робочій точці зупинки як на статичній, так і на динамічній версіях веб-сайтів. Стаття «Technological Support for Business Model Innovation. In Innovation Mechanisms in Start-ups: Practice, Strategies and Impacts» [4] також підтверджує ефективність Webflow, цього разу як інструмента прототипування. Опираючись на статтю «Development and validation of progressive web application usability heuristics (PWAUH)» [5] було проведено порівняння технологій PWA (progressive web apps) та RWD (responsive web design).

Постановка завдання. Мета дослідження полягає у виявленні оптимальних підходів до розробки веб-сайтів та їхнього порівняння.

Викладення основного матеріалу. Розробка такого програмного продукту як веб сайт це зазвичай праця двох і більше спеціалістів вузького профілю: дизайнера, front-end розробника (розробника, який займається візуальною реалізацією дизайнерських рішень: реакція на дії користувача, встановлення кольорової палітри та шрифтових пар, створення анімацій за допомогою мови гіпертекстової розмітки HTML, каскадної таблиці стилів CSS та мови сценаріїв JavaScript) та back-end розробника (розробника, який займається підключенням бази даних (БД), налаштуванням безпеки, швидкодії та іншими функціями, які приховані від користувача з використанням різних мов програмування: PHP, C#, Java і т.п.). Послуги таких спеціалістів коштують недешево, а якщо брати до уваги full-stuck розробників, які мають професійні навички як front-end, так і back-end, то ціни зростають на порядок.

Даний спосіб розробки має наступні переваги:

Безпека – забезпечується налаштуванням брандмауєру (firewall) веб сайту, доступом до серверу мовою програмування PHP та бази даних. Розробка власного веб сайту не має проблем із безпекою, які є в безкоштовних no-code конструкторах, сайти яких побудовані за однаковим кодом, що робить їх більш уразливими до атак хакерів.

Швидкодія – забезпечується версткою сайту, тобто правильним розташуванням контейнерів, періодичним тестуванням коректності відображення вмісту сторінок, підключенням бібліотек JavaScript і роботи з графічним контентом. Усі процедури виконуються задля підвищення швидкості відгуку на дії користувача. Деякі веб-сайти, розроблені за допомогою no-code інструменту конструктора, завантажуються повільніше через роздутий back-end [1]. Ресурси веб-хостингу таких сайтів обмежені тим, що включено до вибраного

плану, чого може бути недостатньо, коли трафік раптово зростає.

Гнучкість та необмеженість дизайну – забезпечується завдяки великій кількості бібліотек та можливостям мов CSS, JavaScript в той час, як no-code конструктори дозволяють користувачам використовувати лише підтримувані інструменти та можливості налаштування.

Просування пошуковими системами – Google, Yahoo та інші сервіси краще взаємодіють з веб сайтами написаними на HTML, CSS та JavaScript. Це зумовлене тим, що класичний код є «чистішим» та краще зчитується пошуковими системами.

Мобільність – перенесення веб сайту на новий хостинг (міграція) не складе великих проблем, на відміну від сайтів, створених за допомогою no-code конструкторів. Деякі розробники таких конструкторів не дозволяють користувачам переносити свої веб-сайти на новий хост через вимоги власної інфраструктури. Така ж ситуація й з домейнами. Не всі no-code конструктори дозволяють підключити власний домен [1].

Low-code платформи, типу Webflow, не мають таких проблем, як їхні no-code аналоги, що робить їх кращими для створення сайту. Дані сервіси можна прирівнювати до класичного методу розробки сайтів по функціоналу та зручності. Але важливо зауважити, що веб сайт створений на Webflow коштуватиме значно менше, його розробка займе менше часу, а допрацювання та редагування будуть легшими ніж робити такі самі дії в коді.

З іншого боку, багато підприємців віддають перевагу no-code платформам. Вибір обумовлений багатьма причинами, зокрема дефіцит кадрів, нестача коштів чи довгий час розробки. Основними факторами, які спонукають виробників створювати продукти без коду, були відсутність розуміння плюсів та мінусів різних методів розробки та перевага no-code платформ у швидкості та економії коштів. Платформи без коду задовольняють початкові потреби виробника та зменшують ризики, роблячи їх першим вибором [6].

No-code/low-code платформи мають наступні переваги:

Простіший вивчення – для написання сайту в коді потрібно витратити десятки, а то й сотні годин вивчаючи правила написання, скрипти та читаючи профільні матеріали. Low-code платформи дозволяють відносно швидко створити якісний продукт з мінімальними знаннями та розумінням коду. В свою чергу no-code конструктори дозволяють людям, які незнайомі з принципами програмування створити готовий про-

дукт вже з готових блоків. Також дані платформи надають широкий вибір як безкоштовних, так і платних шаблонів, за допомогою яких будь-яка людина, що не розбирається в дизайні, зможе створити візуально привабливий продукт просто замінивши весь вміст сайту на власний.

Швидкість розробки та впровадження – підприємці малого бізнесу можуть вийти на ринок вже на протязі від кількох днів (Softr) до кількох місяців (Bubble і Sharetribe). На прикладі Paperound, створення на основі існуючого рішення заощадило приблизно один рік часу розробки. Навіть на більш пізньому етапі швидкість згадується як перевага. Творці можуть швидко тестувати нові функції з реальними користувачами та даними за допомогою працюючого продукту [6].

Економія коштів – користувачі no-code платформ можуть користуватися лише безкоштовними інструментами і запустити в експлуатацію робочий веб сайт. Для прикладу, Вартість в першу чергу згадували стартапи Bubble і Sharetribe. Locumify звільнив додатковий рік на пробій (час, який має бізнес, перш ніж у нього закінчаться гроші), перейшовши з коду на Bubble, а Paperound отримав своїх перших користувачів у безкоштовній пробній версії Sharetribe [6].

Зручність у редагуванні – власники сайтів, які були розроблені на конструкторах чи low-code платформах можуть з легкістю редагувати, видаляти чи змінювати наповнення сайту, якщо воно більше не актуальне. Для цього не потрібно вміти писати кодом чи навіть розумітись на коді, достатньо лише вибрати елемент та завантажити на його місце новий. Щоб змінити контент на сайті, що був розроблений класичним методом потрібно змінювати код та поширювати сайт в інтернеті знову, що може коштувати грошей, так як буде залучений верстальник, та займе багато часу.

Отже, основна функціональність яку пропонує Webflow:

Візуальний інтерфейс – Webflow має інтуїтивний веб-інтерфейс, для створення веб-сторінки, з функціями перетягування та розміщення різних елементів (текст, зображення, кнопки, форми) на сторінці.

Адаптивний дизайн – можливості адаптації до різних пристроїв: Існує можливість легко створювати адаптивні дизайни, які підлаштовуються під різні розміри екранів та типи девайсів, включно з моніторами комп'ютерів, ноутбуків, планшетів та мобільних пристроїв.

Інтерактивність та анімація – анімація елементів: Webflow надає засоби для додавання анімацій

та інтерактивних ефектів до веб-сайту без програмування. У цей список входять: анімації при прокрутці, при завантаженні сторінки, при натисканні, при наведенні, при попаданні елементу в поле зору користувача та багато інших речей, які допоможуть кастомізувати веб сайт та зробити його неповторним.

Форми зворотного зв'язку – Webflow надає можливість створювати HTML форми для збору інформації від користувачів і оброблювати їхні відповіді.

CMS та бази даних – Webflow дозволяє створювати і керувати контентом на своєму веб-сайті, включаючи статті, зображення, товари тощо, створювати інтернет магазини з великою кількістю товарів чи новинні сайти.

Інтеграція з базами даних – наявна можливість підключити веб-сайт до зовнішніх баз даних або використовувати колекції даних прямо в Webflow.

Внутрішній хостинг – Webflow надає можливість хостити ваші веб-сайти безпосередньо на їхньому сервері.

Зовнішній хостинг – на платному тарифі є можливість експортувати код вашого сайту та розміщати його на інших серверах. Це є корисною функцією, враховуючи розвинений ринок та велику конкуренцію між хостинговими платформами.

SEO-інструменти – Webflow має вбудовані інструменти для оптимізації веб-сайту для пошукових систем, такі як налаштування метатегів, SEO заголовку та тексту, картки сайту і т.д.

Контроль коду – Webflow надає можливість отримати доступ до HTML, CSS та JavaScript коду вашого веб-сайту, переглядати та вносити зміни до нього, якщо потрібно. Дана функція буде корисною, якщо розробник хоче переглянути код та кастомізувати його власноруч.

Інтеграція сторонніх сервісів – Webflow дозволяє легко інтегрувати різні сторонні сервіси, такі як Google Analytics, Hotjar, MailChimp і багато інших.

Швидке редагування – власник може змінювати контент та наповнення веб сайту.

Технології web розробки поділяються на дві категорії:

Responsive Web Design (RWD) – це підхід, при якому розробник адаптує свій продукт до різних розмірів екрану та вікон перегляду. Такий підхід також називається версткою веб сайту, яка полягає в налаштуваннях сітки макету, властивостей його елементів, оптимізації екранної щільності (кількість інформації, яка розміщується на екрані,

чим менше екранна щільність, тим інформація, що відображається найбільш доступна і зрозуміла для користувача і навпаки). Таким чином досягається естетичний зовнішній вигляд веб сайту та зручна навігація для користувачів будь-який девайсів з будь-якою роздільною здатністю екрану [7]. Виникнення даної технології зумовлено популяризацією та модернізацією мобільних пристроїв: за даними Business of Apps зараз у світі налічується 2,8 млрд активних користувачів ОС Android.

Progressive Web Apps (PWA): – це підхід, орієнтований повністю на мобільні пристрої. PWA – вебзастосунок, який є гібридом звичайної веб сторінки (чи веб сайту) та мобільного застосунку. Застосування цього підходу створює особливий тип веб-програм, які не потребують встановлення перед використанням і обслуговуються з віддаленого сервера через захищений протокол передачі гіпертексту (HTTPS), на відміну від звичайних мобільних веб-програм, які можуть обслуговуватися за допомогою HTTP [5]. Найпоширенішим прикладом веб-програм є програми Google, такі як Gmail, Google Docs, Spreadsheets і Slides.

При створенні веб-сайту, незалежно від вибору між no-code конструкторами, low-code платформами та класичним програмуванням, RWD залишається одним із найкращих варіантів. Ця методологія має численні переваги, які роблять її привабливою для широкого спектру проектів та бізнес-завдань. RWD розробляється з метою забезпечити належний вигляд і функціональність веб-сайту на різних пристроях, включаючи комп'ютери, планшети та смартфони і може бути успішно реалізована за допомогою як low, так і no-code конструкторів, що робить його доступним для тих, хто не має глибоких знань у програмуванні. RWD спрощує управління контентом та забезпечує швидкий доступ для користувачів, оскільки веб-сайт не лише адаптується до різних розмірів та типів девайсів, але й закриває потреби різних аудиторій [8].

Таким чином, досягненням нашого проекту є створення даного веб-сайту, який відзначається інтегрованістю всього процесу, розпочинаючи від фази дизайну у середовищі Figma та завершуючи розміщенням на хостингу і домені платформи Webflow (webflow.io). Даний підхід має ряд переваг, зокрема, цілодобову підтримку зі сторони команди платформи, що забезпечує безперебійну роботу та доступ до нього з боку як користувачів, так і розробників. Важливо відзначити, що процес

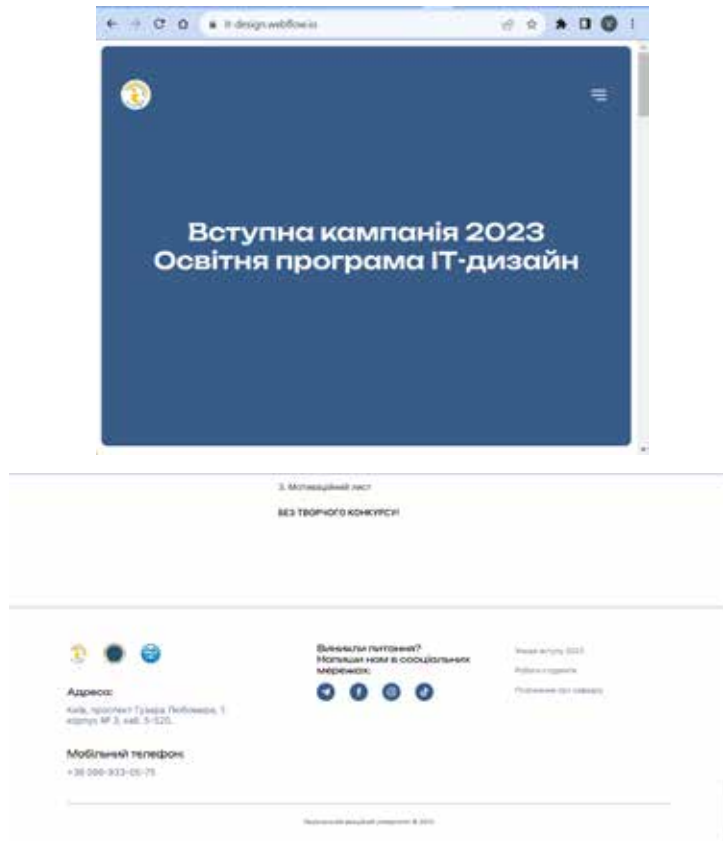


Рис. 1. Демонстрація розміщеного сайту кафедри в браузері та його адаптивного дизайну

створення продукту вимагав значно менше часу порівняно з альтернативним підходом розробки в коді, що сприяє швидкому запуску, що важливо в сучасних умовах для успіху будь-якого проекту.

Висновки. Створено унікальний дизайн веб сайту кафедри комп'ютерних технологій дизайну і графіки з використанням Figma та розроблено

даний макет за допомогою low-code платформи webflow.com. Виявлено сильні та слабкі сторони low-code конструкторів. Проведено їх порівняння з no-code платформами та класичним методом написання сайтів. Описано функціонал Webflow та проілюстровано на прикладі створеного веб сайту.

Список літератури:

1. Blancaflor, Eric B.; Samonte, Sasky A. „An Analysis and Comparison of Proprietary and Open-Source Software for Building E-commerce Website: A Case Study “. Journal of Advances in Information Technology, 2023, 14.3: 426-430. (3)
2. Bexiga, M. Closing the Gap Between Designers and Developers in a Low-Code Ecosystem. 2021. PhD Thesis. MS thesis, NOVA School of Science & Technology.
3. Granqvist, Robin. The performance of Webflow: a comparative study. 2022.
4. Gupta, Varun. Technological Support for Business Model Innovation. In: Innovation Mechanisms in Start-ups: Practice, Strategies and Impacts. Cham: Springer International Publishing, 2022. p. 71-87.
5. Anuar, Nurfarahani Norman; Othman, Mohd Kamal. Development and validation of progressive web application usability heuristics (PWAUH). Universal Access in the Information Society, 2022, 1-29.
6. Heuschkel, Simon. The impact of no-code on digital product development. arXiv preprint arXiv:2307.16717, 2023.
7. Frain, Ben. Responsive Web Design with HTML5 and CSS: Build future-proof responsive websites using the latest HTML5 and CSS techniques. Packt Publishing Ltd, 2022.
8. Elbatanony, Ahmed; Succi, Giancarlo. Towards the no-code era: a vision and plan for the future of software development. In: Proceedings of the 1st ACM SIGPLAN International Workshop on Beyond Code: No Code. 2021. p. 29-35.
9. Nguyen, Tim. Web design fundamentals: Web builder software. Australian Law Librarian, 2020, 28.3: 165-167.

10. Lee, Erika; Ross, Joel; Kramer, Jen. Teaching on the front end: Gathering all educators interested in web and mobile design and development. In: Proceedings of the 51st ACM Technical Symposium on Computer Science Education. 2020. p. 1403-1403.
11. Kang, Joo, et al. Re-building context-oriented graphic design portfolio in the social media age. 2020. Master's Thesis.
12. Luo, Yajing, et al. Characteristics and challenges of low-code development: the practitioners' perspective. In: Proceedings of the 15th ACM/IEEE international symposium on empirical software engineering and measurement (ESEM). 2021. p. 1-11.
13. Frick, Albin. From Design to Code: A Study on Generating Production Code From User Interface Design Software. 2022.
14. Mole, Patrick V.; Mole, P. V. Progressive Web Apps: A Novel Way for Cross-Platform Development. Obtenido de: <https://www.researchgate.net/publication/344170769>, 2020.

Vasylenko V.M., Karpenko M.I., Skybinskyi A.S., Guida O.G. ANALYSIS OF ADVANTAGES AND LIMITATIONS OF NO-CODE PLATFORMS USING WEBFLOW.COM AS AN EXAMPLE

The article is devoted to the study of the topical issue of the advantages and disadvantages of using no-code platforms for creating web resources, with a focus on the analysis of low-code solutions, in particular, the use of the Webflow website builder. The purpose of the study is to identify optimal approaches to website development and compare them. To achieve this goal, various methods of analysis and synthesis were used, in particular, a literature analysis was conducted to study modern approaches to website development and highlight their main advantages and disadvantages. As a result, the key characteristics of different development methods were considered, and their capabilities and limitations were described. Special attention was paid to the creation of the website of the Department of Computer Design and Graphics Technologies of the National Aviation University using Responsive Web Design (RWD) technology and the Webflow designer. The website is designed with the needs of the users in mind. A harmonious appearance of the product and its correct operation on various platforms are ensured. It was found that both low-code and no-code platforms have their own unique advantages, which makes them attractive to different types of users. Low-code platforms, such as Webflow, provide greater flexibility and the ability to edit the code, which leads to fewer restrictions on the functionality and design of the website. The obtained results are of great practical importance for the development and improvement of websites and mobile applications. They will help facilitate access to information for users and improve communication between teachers and students. This work can serve as a valuable resource for education and software development professionals seeking to use mobile technologies to enhance the learning process.

Key words: *Responsive Web Design (RWD), Progressive Web Apps (PWA), low-code, web design, web development.*

Hladka O.M.

National University of Water and Environmental Engineering

Karpovich I.M.

National University of Water and Environmental Engineering

Sabaniuk A.Yu.

National University of Water and Environmental Engineering

ARTIFICIAL NEURAL NETWORKS FOR ANALYSIS OF STOCK MARKET DYNAMICS

A software application has been developed that implements the methods of artificial intelligence and machine learning, and simulates the operation of different types of artificial neural network models. We used the developed software product to forecast the dynamics of the company's stock indicators. Many different factors can affect stock prices, including company news and results, industry indicators, investor sentiment and others economic factors. Because of this complexity, there is great interest in the application of machine learning methods to evaluate large historical data sets of enterprise stock indicators. Predictive models based on machine learning are widely used in industry and research to facilitate the prediction of time and resource allocation, in particular, in business planning, cryptocurrency markets, stock markets, disease spread modeling, pattern recognition, resource allocation, sports analytics, statistics, weather forecasts, etc. We experimented with the following models: Recurrent Neural Networks, Model of Long Short-Term Memory, Multi-Layer Perceptron. Analysis and research of artificial neural networks with different architectures was performed. The features of various models of artificial neural networks and their areas of application are studied. We used the Python programming language and the Jupyter Notebook development environment for the software implementation of the project. The advantage of the Jupyter Notebook development environment, which became decisive in the choice, is the ability to break the code into parts and execute them separately or change the order of code execution. The Python programming language has many built-in frameworks, libraries and extensions that simplify the implementation of various functions, which allowed us to easily create a software application to realize the goals of machine learning. A number of Python libraries and built-in functions for artificial intelligence and machine learning were used in the implementation of the project.

Key words: artificial neural network, time series, machine learning, Deep Learning, Recurrent Neural Networks, Long Short-Term Memory, Multi-Layer Perceptron, Python, Jupyter Notebook.

Formulation of the problem. Time series forecasting is one of the key topics in machine learning. Predictive models based on machine learning are widely used by enterprises to facilitate forecasting of time and resource allocations. After analyzing the data that was saved in the past, it is possible to make informed decisions [1]. Many industries and scientific fields use time series forecasting: business planning; cryptocurrencies; stock markets; modeling of the spread of diseases; pattern recognition; allocation of resources; sports analytics; statistics; weather forecast etc.

The stock market is the basis of any economy. The main goals of any investment in the stock market are to maximize profit and minimize risk. It is very difficult to predict stock prices because of their uncertain behavior. Investing in the stock market can lead to a quick return on investment, so forecasting is one of

the strategies for making a profit. Many different factors can affect stock prices, including company news and results, industry indicators, investor sentiment and economic factors. Because of this complexity, there is great interest in the application of machine learning methods to evaluate large historical data sets of enterprise stock indicators.

Analysis of recent research and publications. The stock market attracts a lot of attention from investors. Capturing the regularity of stock market changes has always been a key point for investors and investment companies. Investors are very interested in the research area of stock price forecasting. To make a successful investment, many investors want to know the future of the stock market [2].

Machine learning algorithms can recognize patterns and relationships between the data they are

trained on, build mathematical models related to those patterns, and use those models to make predictions or make decisions. In addition, the more information machine learning-based systems can process, the more sophisticated these models will become, allowing algorithms to improve their analytical and predictive performance [3–4].

Such opportunities are important for financial companies. By examining inputs including stock trends, corporate metrics, financial news, investor behavior, and social media information, these models can pinpoint the subtlest, non-linear relationships between all of these variables. Based on such findings, they will create realistic forecasts of the value of securities and provide market players with useful information and recommendations for future investments [5].

Evaluating machine learning algorithms for stock market forecasting is a task that should be approached with due caution for two good reasons. First, research is still ongoing and far from reaching universally accepted results, since the range of algorithms suitable for this purpose is quite wide, and evaluating their accuracy in different scenarios can be quite difficult. Second, corporations and investment firms are generally reluctant to disclose their machine learning algorithms in order to maintain a competitive advantage. Nevertheless, a general idea of the progress in the development and implementation of algorithms can be obtained from academic studies and reports of scientific societies focusing on different methods of predicting the value of securities [6].

Task statement. The purpose of the work is to develop a software implementation and study the results of training of the most common artificial neural networks. We took the data of the Amazon company's stock indicators from the Yahoo! Finance for 5 years as an object of forecasting. The subject of the research is forecasting the dynamics of the stock market using artificial neural networks.

An artificial neural network is an information processing system that arose as a generalization of mathematical models of neural biology. An artificial neural network is characterized by:

- a pattern of connections between neurons (architecture);
- the method of determining the weighting coefficients of connections (learning algorithm);
- the internal state of neurons (activation function).

An artificial neuron or neural node is a mathematical model. In most cases, it calculates a weighted average of the input and then applies a bias to it. It

then passes the resulting signal through the activation function. This activation function is a non-linear function, such as a sigmoid function, which takes a linear input and produces a non-linear output [7].

Outline of the main material of the study. In our work, we investigated the following models of artificial neural networks: Recurrent Neural Networks, Model of Long Short-Term Memory, Multi-Layer Perceptron.

Recurrent Neural Network (RNN) is a type of artificial neural network that implements deep learning algorithms, typically used for ordinal or temporal problems such as translation, speech recognition and processing, image captioning, etc. They are distinguished by their memory because they take information from previous inputs to influence current inputs and outputs. In traditional deep neural networks, the inputs and outputs are independent of each other, but the outputs of recurrent neural networks depends on the previous elements in the sequence [8].

Another distinguishing characteristic of recurrent networks is that they share parameters at each layer of the network. While feed-forward networks have different weights for each node, recurrent neural networks have the same weight parameter at each level of the network. However, these weights are adjusted using backpropagation and gradient descent processes to facilitate reinforcement learning.

Recurrent Neural Networks use a time-based backpropagation algorithm to determine gradients, which is slightly different from traditional backpropagation because it is specific to sequence data. The principles of the time backpropagation algorithm are the same as traditional backpropagation, where the model is trained by computing the errors from the output to the input layer. These calculations allow you to correctly adjust and fit the model parameters.

The time backpropagation algorithm differs from the traditional approach in that it accumulates the errors at each time step, whereas other networks do not need to sum the errors because they do not share the parameters at each level. Due to this process in RNN, there are two problems such as exploding gradients and vanishing gradients. These problems are defined by the size of the gradient, which is the slope of the loss function along the error curve. When the gradient is too small, it continues to decrease, updating the weight parameters until they become negligible, i.e. 0. When this happens, the algorithm no longer learns.

Explosive gradients occur when the gradient is too large, creating an unstable model. In this case, the model weights will grow too large and will eventually

be represented as NaN. One of the solutions to these problems is to reduce the number of hidden layers in the neural network, eliminating part of the complexity in the RNN model [8].

There are different RNN architectures that are used in machine learning tasks [9]:

- Bidirectional Recurrent Neural Networks (BRNN) – inputs from future time steps are used to improve the accuracy of the network;
- Gated Recurrent Units (GRU) – developed to solve the problem of gradient disappearance; have a reset and refresh gateway and determine what information should be stored for future predictions;
- Long short-term memory (LSTM) – designed to solve the problem of gradient disappearance.

Long Short-Term Memory (LSTM) is a subtype of recurrent neural networks. They are used to recognize patterns in data sequences appearing in sensor data, stock prices or natural language. Recurrent neural networks store previous data in their short-term memory. When memory runs out, they simply delete the longest stored information and replace it with new data. The LSTM model tries to avoid this problem by storing selected information in long-term memory. This long-term memory is stored in the so-called cell state. In addition, there is also a hidden state in which short-term information from previous steps of the calculation is stored. At each step of the calculation, the current input, the previous state of the short-term memory and the previous state of the hidden state are used [10].

Multi-Layer Perceptron (MLP) is the most widely used form of feed-forward neural networks. Input patterns are represented at the input layer, and the resulting block activations are propagated through hidden layers to the output layer (forward network). Blocks in hidden layers usually have non-linear activation functions. Since the behavior of the function is parameterized by the connection weights, the MLP can approximate any continuous function on a compact input domain with arbitrary precision [9].

In the work, the Mean Absolute Error (MAE) and Mean Square Error (MSE) were used as **metrics to assess the quality of forecasting**.

The average absolute error (MAE) is the average value of errors in the predictions of the model:

$$MAE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |Y_i - \hat{Y}_i|.$$

The mean squared error (MSE) is used in cases where it is necessary to emphasize large errors and choose a model that gives fewer particularly large errors:

$$MSE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (Y_i - \hat{Y}_i)^2.$$

Here, Y_i are the actual values, \hat{Y}_i are the predicted values, and n is the number of observations.

Optimization algorithms are aimed at increasing the effectiveness of learning algorithms by increasing their accuracy in forecasting tasks. We analyzed the following optimization algorithms:

- **Stochastic Gradient Descent (SGD)** uses only one sample from the entire data set for each iteration, which avoids redundant computations in a large data set to update a parameter;
- **Root Mean Square Propagation (RMSprop)** is an optimization technique based on momentum gradient descent that limits vertical fluctuations and dynamically adjusts the learning rate by choosing different rates for different parameters;
- **Adam** is an optimization algorithm that calculates the rate of adaptive learning of individual parameters using only first-order gradients; it combines the capabilities of optimization algorithms such as RMSprop (works well with mobile and online environments) and AdaGrad (works well with sparse gradients);
- **Adamax** is a variant of the Adam optimization method; it proved to be stable in the form of infinite order, which distinguishes it from other optimizers [11].

In the work, the Adam optimization method was chosen for the prediction of neural networks.

Activation functions in neural networks and deep learning algorithms play an important role in igniting hidden nodes to obtain a more desirable result [12]. To train neural networks, we used ReLU (*Rectified linear unit*), which is an activation function that introduces the property of nonlinearity into the deep learning model and solves the problem of vanishing gradients.

Development tools and environment. The Python programming language and the Jupyter Notebook development environment were chosen for the construction and training of artificial neural networks. The main advantage of the Jupyter Notebook environment over traditional development tools, which was decisive in the choice, is the ability to break the code into parts and execute them separately or change the order of code execution.

Although machine learning and artificial intelligence are complex algorithms and various workflows, the Python programming language allows developers to build reliable systems. Python has many frameworks, libraries, and extensions

that make it easy to implement various features and allows you to quickly create prototypes that allow you to test your product for machine learning purposes. The following libraries for artificial intelligence and machine learning were used in the work:

- *TensorFlow* is a machine and deep learning framework used for numerical calculations and determination of data flows; allows training and running deep neural networks for image recognition, handwritten digit classification, recurrent neural network, word embedding, natural language processing, video detection, etc. [13];
- *NumPy*, *SciPy* are basic packages for high-performance scientific computing and data analysis;
- *Pandas* is a software library for general purpose data analysis and processing [14];
- *Keras* is a special library for neural networks that works on top of TensorFlow; supports numerous neural network server calculations [15];
- *Seaborn* for data visualization;
- *Scikit-learn* contains a variety of classification, regression, and clustering algorithms, including support vector machines, random forests, gradient boosting, k-means, etc.

Results of computational experiments. The work used the closing prices of shares of Amazon (AMZN) over the past 5 years (05-15-2018 to 05-12-2023). Analysis data was downloaded from Yahoo!Finance, which offers historical and real-time stock market data. An analysis of non-zero values and data types in the set was carried out, basic statistics of numerical series were obtained and a check was made for the absence of missing values in the data set.

Each constructed neural network was divided into training and test sets, where 80% of the data is used for training and 20% for testing the model. All models were compiled with the *Adam* optimizer and the *Mean Squared Error* loss function, and the *ReLU* activation function was used.

A Recurrent Neural Network (RNN) is a deep learning network framework that has the advantage of taking the context of the data into account during the learning process. The indicators of model eval-

uations for some built architectures (the number of epochs is 100) are listed in the table 1:

1. RNN consisting of one layer with 64 neurons, where a Dense layer with one neuron is added after the RNN layer.
2. RNN with two layers of 64 neurons each.
3. RNN consists of three layers, where the first one with 128 neurons takes serial input and returns serial output, the next layer with 64 neurons, which takes input from the first layer and returns only the last output state, also added a Dense layer with 1 neuron (Fig. 1).

Long Short-Term Memory (LSTM) is a powerful time series algorithm that can capture historical trends and predict future values with high accuracy. The LSTM model evaluation indicators for some built architectures (the number of epochs is 200) are listed in the table. 2.

The best LSTM result with architecture: one layer with 128 neurons this layer returns sequential outputs for further use, a second layer with 64 neurons that receives sequential outputs from the previous one and one Dense layer with one output, to get the final prediction (Fig. 2).

In the table 3 shows the evaluation indicators of the Multi-Layer Perceptron (MLP) model with 6 different architectures with different number of hidden layers.

The best result obtained is the MLP model, which has one hidden layer with 128 neurons and uses the ReLU activation function. The last layer has one neuron without an activation function, which is designed to predict the share price (Fig. 3).

Therefore, with the increase in the number of layers and neurons, the models show more accurate results with the smallest MAE and MSE errors.

Conclusions. Methods of forecasting the dynamics of the stock market using artificial neural networks are investigated in the work. Predicting the value of securities using machine learning helps to know the price of a company's stock and other financial assets.

Stock market forecasting aims to determine the future movement of the value of financial exchange securities. Accurately predicting the price movement will result in higher profits that investors can

Table 1

RNN model evaluation indicators					
No	units	Train MAE	Train MSE	Test MAE	Test MSE
1	64	0.2886	0.1255	0.3016	0.1308
2	64, 64	0.1081	0.0185	0.1242	0.0197
3	128, 64	0.0429	0.0038	0.0718	0.0061

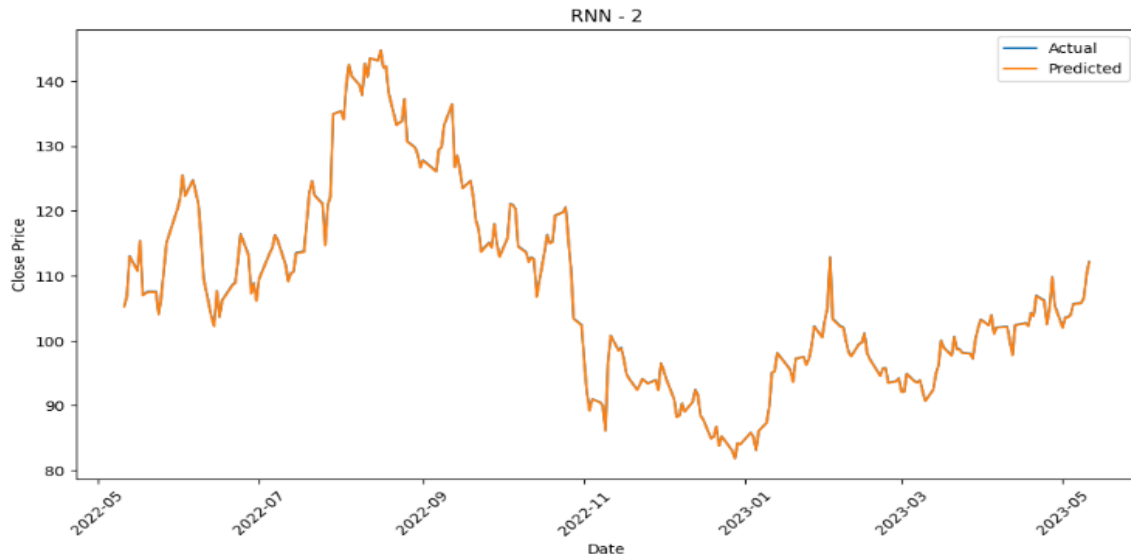


Fig. 1. Forecast and actual values of the RNN model

Table 2

LSTM model evaluation indicators

No	units	Train MAE	Train MSE	Test MAE	Test MSE
1	64	0.7383	0.9647	1.0006	1.4501
2	128, 64	0.0826	0.0137	0.0117	0.0220
3	64, 64	0.9887	2.3996	0.6743	0.7013
4	128	0.4454	0.3528	0.4491	0.3038

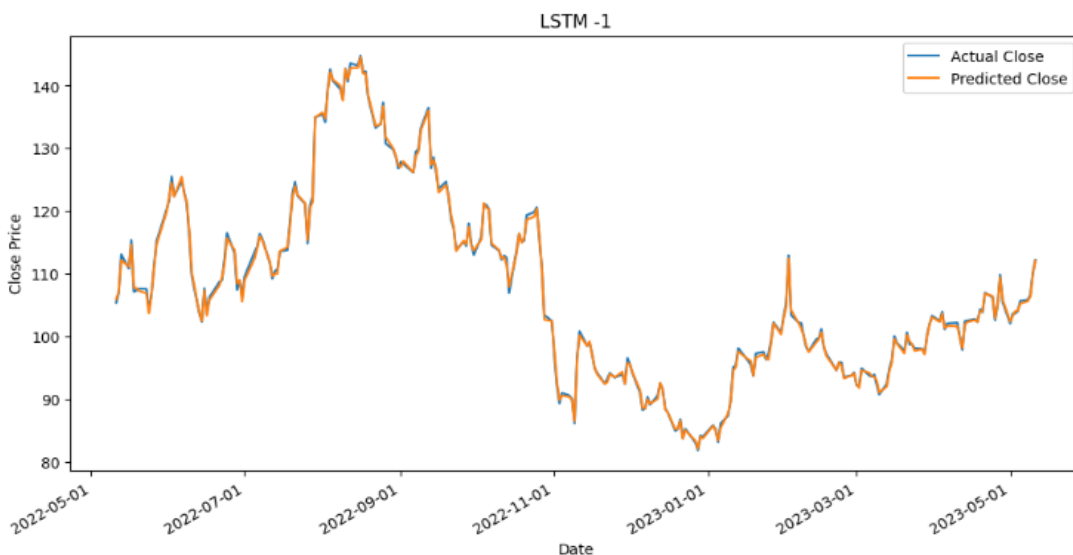


Fig. 2. Forecast and actual values of the LSTM model

make. Predicting how the stock market will move is one of the most difficult matters as it is influenced by many factors such as interest rates, politics, economic growth, which make the stock market volatile and very difficult to predict accurately. Stock forecasting

offers huge chances of profit and is the main motivation for research in this field, knowing about the movement of stocks in a fraction of a second can lead to high profits. Since investment in securities is the main activity of the financial market, lack of accu-

MLP model evaluation indicators

No	units	epochs	Train MAE	Train MSE	Test MAE	Test MSE
1	32	100	0.2294	0.0976	0.2711	0.1231
2	64	100	0.5496	0.5473	0.6909	0.7395
3	64	200	0.1971	0.0751	0.2331	0.0831
4	64, 64	100	0.0158	0.0004	0.0236	0.0011
5	128	100	0.2890	0.1590	0.3458	0.1827
6	128	200	0.0261	0.0015	0.0253	0.0009

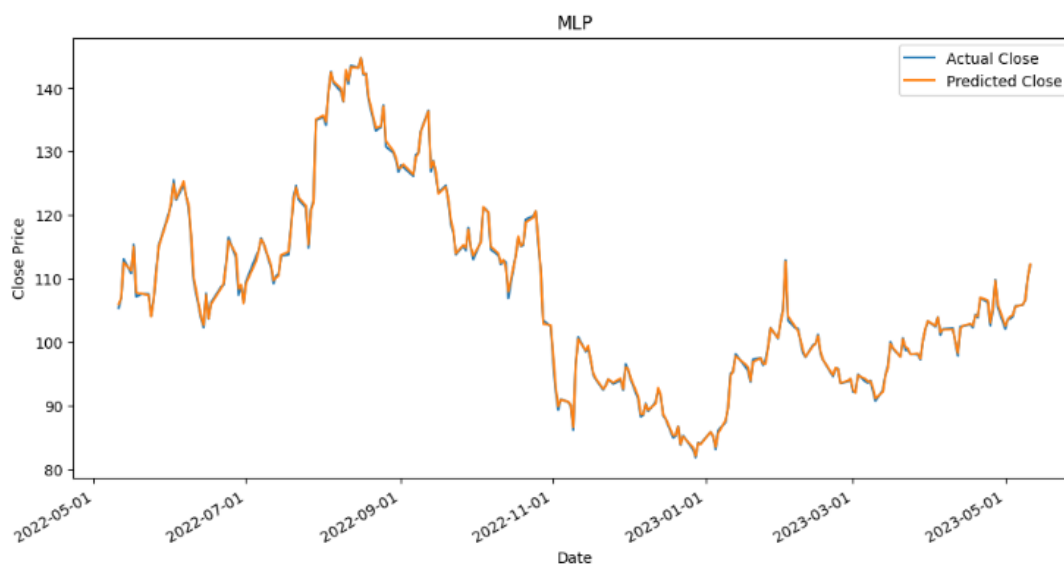


Fig. 3. Forecast and actual values of the MLP model

rate knowledge and detailed information will lead to loss of investment. Forecasting the stock market is a difficult task because market movements are always subject to uncertainty.

The software implementation of the most common neural network models with different architectures

was created using the Python programming language and in the Jupyter Notebook development environment. We used to create models: Recurrent Neural Networks, Long Short-Term Memory, Multi-Layer Perceptron.

Developed models can be retrained for new data.

Bibliography:

1. Fundamental Analysis of Stocks: Explained, 2021. URL: <https://www.mstock.com/articles/fundamental-analysis> (Referred 24.03.2024).
2. K. Gülen, Applying machine learning in financial markets: A review of state-of-the-art methods, 2023. URL: <https://dataonomy.com/category/topics/data-science/machine-learning/> (Referred 24.03/2024).
3. S. Asadi, E. Hadavandi, F. Mehmanpazir, M. M. Nakhostin, "Hybridization of evolutionary Levenberg–Marquardt neural networks and data pre-processing for stock market prediction." Knowledge-Based Systems 35 (2012): 245-258. DOI: 10.1016/j.knsys.2012.05.003.
4. P. Hrytsiuk, T. Babych, S. Baranovsky, M. Havryliuk. Assessing of Climate Impact on Wheat Yield using Machine Learning Techniques. CEUR Workshop Proceedings, Vol-3513. Proceedings of the 11-th International Conference "Information Control Systems & Technologies" (ICST 2023), Odesa, Ukraine, September 21–23, 2023. pp. 314-329.
5. F. S. Alzazah and X. Cheng, Recent Advances in Stock Market Prediction Using Text Mining: A Survey, in: E-Business – Higher Education and Intelligence Applications, 2020. DOI: 10.5772/intechopen.92253.
6. K. Li, Predicting Stock Prices Using Machine Learning, 2023. URL: <https://neptune.ai/blog/predicting-stock-prices-using-machine-learning> (Referred 24.03/2024).
7. N. Bhargav, Neurons in Neural Networks, 2022. URL: <https://www.baeldung.com/cs/neural-networks-neurons> (Referred 24.03/2024).

8. What are recurrent neural networks? URL: <https://www.ibm.com/topics/recurrent-neural-networks> (Referred 24.03/2024).
9. A. Graves, Supervised Sequence Labelling with Recurrent Neural Networks, Springer, Berlin, Heidelberg, 2012. DOI: 10.1007/978-3-642-24797-2
10. Long Short-Term Memory Networks (LSTM) – simply explained!, 2022. URL: <https://databasecamp.de/en/ml/lstms> (Referred 24.03/2024).
11. N. Saurabh, "LSTM-RNN model to predict future stock prices using an efficient optimizer." International Research Journal of Engineering and Technology (IRJET), 7.11, 2020, 672-677.
12. J. Brownlee, A Gentle Introduction to the Rectified Linear Unit (ReLU), 2020. URL: <https://machinelearningmastery.com/rectified-linear-activation-function-for-deep-learning-neural-networks> (Referred 24.03/2024).
13. TensorFlow. URL: <https://www.javatpoint.com/tensorflow> (Referred 24.03/2024).
14. Pandas, 2021. URL: <https://www.nvidia.com/en-us/glossary/data-science/pandas-python> (Referred 24.03/2024).
15. R. Kumar, What is Keras and How it works? An Overview and Its Use Cases, 2022. URL: <https://www.devopsschool.com/blog/what-is-keras-and-how-it-works-an-overview-and-its-use-cases> (Referred 24.03/2024).

Гладка О.М., Карпович І.М., Сабанюк А.Ю. ШТУЧНІ НЕЙРОННІ МЕРЕЖІ ДЛЯ АНАЛІЗУ ДИНАМІКИ ФОНДОВОГО РИНКУ

Розроблено програмний застосунок, який реалізує методи штучного інтелекту та машинного навчання, симулює роботу різних типів моделей штучних нейронних мереж. Розроблений програмний продукт використано для прогнозування динаміки біржових показників підприємства. На ціни акцій можуть впливати багаторізних чинників, зокрема новини та результати діяльності компаній, показники галузі, настрої інвесторів та інші економічні чинники. Через таку складність існує великий інтерес до застосування методів машинного навчання для оцінки великих історичних наборів даних фондових показників підприємств. Прогнозні моделі на основі машинного навчання широко використовуються у промисловості та наукових дослідженнях для полегшення прогнозування розподілу часу та ресурсів, зокрема, у бізнес плануванні, на ринку криптовалют, фондових ринках, при моделюванні поширення хвороб, розпізнаванні образів, розподілу ресурсів, у спортивній аналітиці, статистиці, прогнозі погоди тощо. Ми експериментували з наступними моделями: Рекурентні нейронні мережі, Модель довготривалої короткочасної пам'яті, Багатошаровий перцептрон. Досліджено особливості різних моделей штучних нейронних мереж та сфер їхнього застосування. Проведено аналіз та дослідження штучних нейронних мереж з різною архітектурою. Для програмної реалізації проекту використано мову програмування Python та середовище розробки Jupyter Notebook. Перевагою середовища Jupyter Notebook, що стала вирішальною при виборі, є можливість розбити код на частини та виконувати їх окремо чи змінювати порядок виконання коду. Мова програмування Python має багато вбудованих фреймворків, бібліотек і розширень, які спрощують реалізацію різних функцій, що дозволило без зайвих зусиль створити програмний застосунок для реалізації цілей машинного навчання. В реалізації проекту використано низку бібліотек і вбудованих функцій Python для штучного інтелекту та машинного навчання.

Ключові слова: *штучна нейронна мережа, часові ряди, машинне навчання, глибоке навчання, Рекурентні нейронні мережі, Модель довготривалої короткочасної пам'яті, Багатошаровий перцептрон, Python, Jupyter Notebook.*

Гончаров Д.С.

Чорноморський національний університет імені Петра Могили

Гончарова Н.В.

Чорноморський національний університет імені Петра Могили

Кандиба І.О.

Чорноморський національний університет імені Петра Могили

АРХІТЕКТУРА БАГАТОРІВНЕВОЇ СИСТЕМИ МОНІТОРИНГУ СТАНУ ЗДОРОВ'Я ЛЮДИНИ

У статті досліджено особливості реалізації багаторівневої архітектури системи моніторингу стану здоров'я людини. Проведено аналіз сучасних досліджень в галузі медичних систем, визначено їхнє призначення та основний функціонал. Розглянуто особливості процесу збору даних про фізичний стан людини та особливості реалізації цього процесу. Представлено концептуальну модель багаторівневої архітектури для реалізації функцій системи моніторингу стану здоров'я людини. Наведено опис концепції Internet of Medical Things (IoMT), що використовується в сучасному світі для реалізації функцій відслідковування деяких показників стану здоров'я людини в реальному часі. Визначено основні протоколи передачі даних, що використовуються пристроями концепції IoMT. Наведено схематичну модель передачі даних між застосунками та пристроями IoMT, описано особливості застосування зазначеної концепції. Проаналізовано можливості мови Python в контексті розробки багаторівневої системи моніторингу стану здоров'я людини. Проаналізовано можливість застосування інструментарію Django для створення багаторівневої архітектури інформаційної системи та застосування мови Django Template Language для реалізації рівня представлень системи моніторингу стану здоров'я людини. Проаналізовано можливість візуалізації зібраних даних за допомогою інструментарію Google Chart. Описано можливість застосування засобів Object Relational Mapping для реалізації рівня даних розробленої системи. Визначено найбільш доцільну систему керування базою даних, що дозволяє реалізувати реплікацію даних та підтримує можливість роботи з великою кількістю даних. Наведено опис структури системи моніторингу стану здоров'я людини з використанням балансувача навантаження та кількох окремих серверів для реалізації рівня логіки. Запропоновано шляхи подальшого розвитку багаторівневої системи моніторингу стану здоров'я людини.

Ключові слова: IoMT, Python, Django, багаторівнева архітектура, MySQL.

Постановка проблеми. Зростаюча кількість людей, які стикаються з хронічними захворюваннями, такими як діабет, серцево-судинні захворювання, онкологія; обумовлює зростання потреби у спеціалізованих системах моніторингу стану здоров'я людини. Ці системи можуть допомагати відслідковувати та контролювати хронічні захворювання, а також забезпечити швидку реакцію на погіршення стану здоров'я.

Реалізувати систему моніторингу стану здоров'я людини можливо використовуючи різні архітектурні моделі: Monolithic application, Database-centric, Distributed computing, Front end та back end architecture. Проте, використовуючи окремі існуючі архітектури, неможливо в повній мірі реалізувати функції моніторингу стану здоров'я людини:

– модель monolithic application може бути застосована для взаємодії з датчиками, але в ній не передбачена можливість масштабування окремих складових [1, с. 2], наприклад, збору або обробки даних, що є особливо актуальним при роботі системи моніторингу здоров'я людини, що робить цю архітектуру не оптимальною;

– модель Database-centric може використовуватись під час реалізації збору даних, але сама модель не включає елементи балансування навантаження при виконанні значних обсягів запитів [2, с. 3], що виконуватимуться в реалізованій системі моніторингу стану здоров'я;

– модель Front end та back end architecture дозволяє розділити програмне забезпечення на кілька компонентів та знизити навантаження на сервер збору та обробки даних шляхом вико-

ристання обчислювальних ресурсів клієнта, але ця модель не включає в себе можливість балансування навантаження між кількома серверами у разі великої кількості запитів;

– модель Distributed computing призначена для реалізації розподілення навантаження між різними комп'ютерами (серверами), але модель недостатньо уваги приділяє взаємодії розподілених компонентів та баз даних, а також можливості балансування навантаження між розподіленими компонентами.

Таким чином, необхідним є створення системи моніторингу стану здоров'я людини на основі комбінування архітектур програмного забезпечення (ПЗ), що дасть змогу реалізувати централізований збір деяких фізичних показників здоров'я та їхню обробку при наявності великої кількості даних з датчиків різного типу.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. У дослідженні [3 с. 5] наведено аналіз датчиків моніторингу здоров'я людини, що використовуються в процесі реабілітації. Авторами досліджено різне медичне обладнання для моніторингу стану пацієнтів, що проходять реабілітацію; описано принципи збору та візуалізації даних. В цій роботі також розглянуто можливість інтеграції актуального ПЗ у галузі моніторингу стану здоров'я, з серверами збору даних, наприклад, телемедичні технології у реабілітації пацієнтів з травмами нижніх кінцівок [3 с. 8]. Однак, у роботі не запропоновано варіант реалізації архітектури ПЗ для забезпечення збору та обробки даних з великої кількості датчиків одночасно.

Робота [4 с. 103] містить опис сучасних медичних інформаційних систем. Наведені авторами системи дозволяють організувати взаємодію фахових лікарів з пацієнтами, проводити статистичний аналіз загальної захворюваності, проводити онлайн консультації, збирати результати аналізів тощо. Наведено ґрунтовні дослідження медичних систем, однак недостатньо уваги приділено можливості інтеграції засобів моніторингу стану здоров'я людини та зазначених систем.

Одним з головних напрямів дослідження в галузі медичних інформаційних систем є побудова централізованих систем, наприклад, розробка єдиної медичної інформаційної системи великого міста. У роботі [5 с. 39] наведено опис архітектури інформаційної системи, що дозволить об'єднати лікарні міста та організувати взаємодію між ними. Однак, в роботі недостатньо уваги приділено реалізації можливості зберігання, обробки,

обміну даними моніторингу стану здоров'я людини.

В сучасних дослідженнях увага приділяється можливості застосування мікроконтролерів на зразок Arduino [6 с. 187]. Авторами запропоновано використання шаблону Model-View-Presenter з метою створення ПЗ збору, обробки та відображення даних, але не розглянуто можливість використання спеціалізованих серверів для обробки даних з великої кількості датчиків.

Виконаний аналіз показав, що дослідження системи моніторингу стану здоров'я людини проводяться за різними напрямками: створення медичних інформаційних системи, реалізації централізованих медичних систем великого міста, інтеграція обладнання, побудованого на мікроконтролерах, для відслідковування показників стану здоров'я в реальному часі тощо; але більшість досліджень приділяють недостатньо уваги саме архітектурі зазначених систем, що, в свою чергу, робить питання розробки архітектури розподіленої багаторівневої системи моніторингу стану здоров'я людини актуальним.

Постановка завдання. Метою цього дослідження є розробка архітектури та програмного забезпечення для інформаційної технології системи моніторингу стану здоров'я людини. Створення цієї інформаційної системи дозволить забезпечити більш точно та ефективно діагностування захворювань шляхом спрощення процедур збору та аналізу показників фізичного стану людини. Для досягнення зазначеної мети поставлені такі задачі:

- аналіз архітектури та технологій сучасних медичних інформаційних систем;
- розробка багаторівневої архітектури інформаційної системи збору та обробки даних про фізичний стан людини;
- реалізація спроектованої інформаційної системи.

Виклад основного матеріалу. Джерелами даних моніторингу стану здоров'я людини можуть бути різні пристрої: мікроконтролери, одноплатні комп'ютери, мобільні пристрої, спеціалізоване медичне обладнання тощо. Реалізувати збір даних з усіх зазначених джерел можливо за допомогою використання технологій вебзапитів, що може бути застосованим на пристроях різної архітектури. Враховуючи, що одночасно до системи може бути підключена велика кількість користувачів та передача даних здійснюватиметься за допомогою вебзапитів, необхідна значна кількість обчислювальних ресурсів.

Швидкий темп розвитку датчиків та медичного обладнання приведе до зростання кількості даних, що надходитимуть до інформаційної системи моніторингу стану людини, а це, в свою чергу, обумовлює потребу масштабування системи під час її використання. Створення зазначеної системи на основі монолітної архітектури неможливе через відсутність можливості масштабування обчислювальних потужностей та функціоналу. Отже, для цієї системи треба використати багаторівневу архітектуру з можливістю балансування навантаження.

Поставлені завдання можна виконати, поділивши систему на рівні, кожен із яких взаємодіє лише з двома сусідніми. Кожен рівень такої архітектури виконує власний обмежений набір функцій. Тому функціональність рівнів можна змінювати без ризику глобальних конфліктів між ними (рис. 1).



Рис. 1. Концептуальне представлення рівнів інформаційної системи моніторингу стану здоров'я людини

Реалізувати збір показників стану людини на фізичному рівні є складною задачею, що в сучасному світі вирішується за допомогою використання концепції Internet of Medical Things (IoMT). Ця концепція полягає в поєднанні різного медичного обладнання та застосунків за допомогою використання мережі Інтернет [7 с. 776].

Концепція IoMT реалізується на базі різних протоколів, але найчастіше для взаємозв'язку обладнання використовується протоколи HTTP та HTTPS. Це, в свою чергу, забезпечує можливість використання різноманітних хмарних техноло-

гій для зберігання та обробки даних та окремий інтерфейс для взаємодії з медичним персоналом. Зазначена особливість дозволяє спростити процес моніторингу медичним персоналом показників стану здоров'я людини завдяки постійній передачі поточних значень [7 с. 776]. Окрім того, інтеграція з різними застосунками забезпечує спрощення доступу до ліків шляхом використання електронних рецептів, автоматизацію ведення історії хвороби при взаємодії з сервісами електронних карток пацієнтів (рис. 2).

Можна інтегрувати багаторівневу архітектуру та концепцію IoMT, використовуючи сучасні мови програмування та спеціалізовані фреймворки для обміну даними за допомогою протоколів HTTP та HTTPS.

Мова програмування загального призначення Python є однією з найбільш розповсюджених та сучасних мов. Регулярне оновлення та вдосконалення Python забезпечує підтримку сучасних концепцій, підходів до програмування. Окрім того, наявність відкритого репозиторію з великою кількістю різних бібліотек дозволяє легко масштабувати функціонал розроблених застосунків.

Python підтримує широкий спектр інструментарію для аналізу даних та реалізації різних технологій, у тому числі вебсервери для обробки запитів HTTP та HTTPS [8 с. 5]. Найбільш розповсюдженим та функціональним засобом реалізації вебсерверу для Python є фреймворк Django.

Django є високорівневим вебфреймворком Python, що дозволяє створення застосунків з архітектурою Model-View-Controller (MVC) [9 с. 23]. Використання цього фреймворку дає змогу розділити рівні подання, логіки та даних за допомогою патерну MVC.

Рівень подання у багаторівневій системі моніторингу стану здоров'я людини на базі Django може бути представлений у вигляді HTML сторінки, що генерується за допомогою шаблону, описаного мовою Django Template Language (DTL). DTL дозволяє динамічно додавати в статичний шаблон HTML контент з можливістю використання мови JavaScript (JS) та додаткових бібліотек для нього.

Візуальна інформація може бути ще більш наглядною та легше сприйматись звичайними користувачами (пацієнтами), аніж інформація іншого типу. Окрім того, аналізуючи графічне зображення, значно простіше виявити відхилення у зібраних показниках. Отже, для повноцінної реалізації рівня подання в системі моніторингу стану здоров'я необхідна інтеграція інструментарію візуалізації даних.

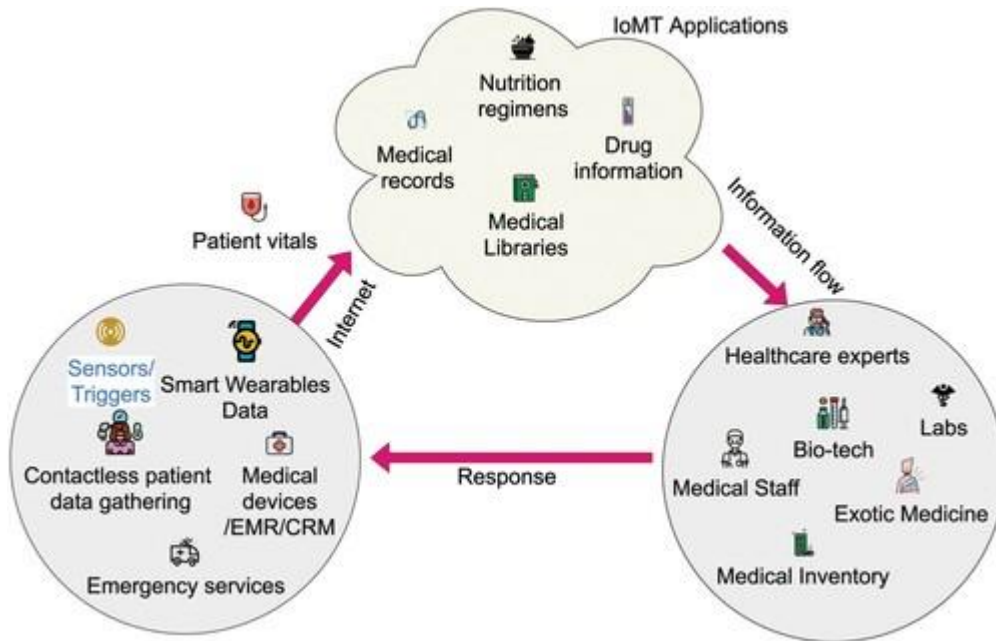


Рис. 2. Схематична модель використання ІоМТ [7 с. 777]

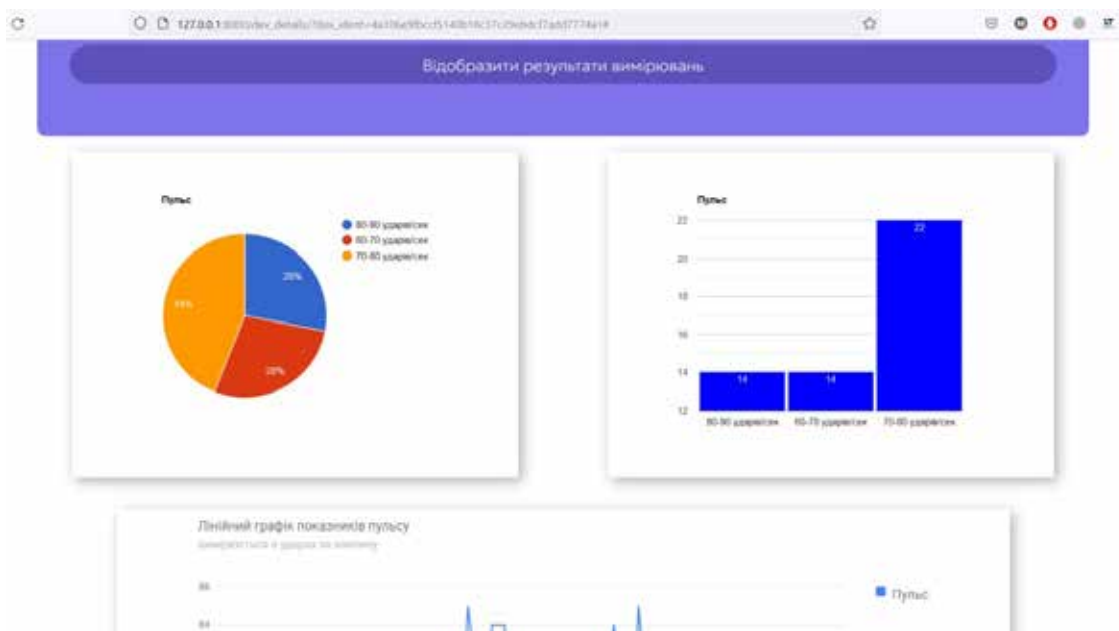


Рис. 3. Графічне представлення зібраних даних

Задіяний на рівні представлення JS дозволяє візуалізувати дані у вигляді гістограм, кругових та кореляційних діаграм тощо. Графічне відображення зазначених діаграм забезпечується інструментарієм Google Chart. Цей інструментарій, представлений у вигляді окремої бібліотеки JS, є безкоштовним та може бути інтегрований з будь-яким HTML шаблоном.

В багаторівневій системі моніторингу стану здоров'я людини Google Chart дозволяє створити графічне відображення зібраних показників окси-

генації, пульсу, кров'яного тиску тощо. Використання DTL у поєднанні з JS дозволяє здійснити параметризовану вибірку необхідних вимірювань та їх динамічне відображення (рис. 3).

Рівень логіки застосунків, побудованих на основі фрейворку Django, реалізується за допомогою мови Python. Взаємозв'язок коду Python та шаблонів DTL здійснюється за допомогою Django та засобами GET та POST запитів. Такими чином, на рівні логіки можна інтегрувати засоби обробки даних, що підтримуються мовою програмування

Python, включно з інструментарієм штучного інтелекту, який є актуальним напрямом в сучасній медицині.

Нормальне функціонування системи моніторингу стану здоров'я людини вимагає реалізації на рівні логіки коректної обробки отриманих запитів та передачу показників до рівня даних. Враховуючи, що система має підтримувати сучасну концепцію IoT та забезпечувати безпеку даних користувача, використана вбудована технологія CSRF protection, що унеможливує доступ до даних неавторизованих користувачів. При цьому для відображення отриманих зібраних даних користувачу використано інструментарій авторизації Django, що також запобігає неавторизованому доступу до них.

Отримані дані мають бути збережені та доступні за запитом користувача, що, в свою чергу, забезпечується засобами Object Relational Mapping (ORM) фреймворку Django. Використання ORM значно спрощує розробку коду необхідного для коректної взаємодії з системою керування базою даних (СКБД).

Інтеграція зазначених технологій захисту даних вимагає наявності спеціалізованих таблиць в базі даних (БД). Мінімальний функціонал системи моніторингу стану здоров'я людини має включати в себе відслідковування кров'яного тиску, оксигенації, частоти серцебиття (пульсу), температури та даних користувача для реалізації концепції IoT. Враховуючи перелічені показники, вимоги

безпеки та дані інструментарію логування Django, структура БД містить 18 таблиць (рис. 4).

За замовчування проекти створенні на основі Django використовують у якості СКБД SQLite, але ця СКБД має ряд недоліків, що не дозволяють її використовувати для роботи з даними в системі моніторингу стану здоров'я людини. Основним недоліком SQLite є відсутність спеціалізованого серверу, що унеможливує реалізацію реплікації та кешування даних для пришвидшення доступу.

Доцільнішим є використання реляційної СКБД MySQL, яка працює на окремому сервері та може бути реплікована вбудованими засобами, а наявний інструментарій Query Cache забезпечує швидкодію при роботі з великими об'ємами даних. Зазначені переваги у сукупності з вбудованими драйверами Django роблять цю СКБД оптимальним рішенням.

Велика кількість запитів до БД в системі моніторингу стану здоров'я людини може занадто навантажувати сервер СКБД та сповільнювати його роботу. Доцільним рішенням є використання кількох паралельно працюючих серверів для реалізації рівня логіки та кількох серверів СКБД з реалізацією реплікації для зменшення навантаження.

Підвищити надійність роботи представленої системи можливо шляхом підключення додаткових вебсерверів та додавання балансувача навантаження. Отже, ефективна робота системи моніторингу стану здоров'я людини має містити три

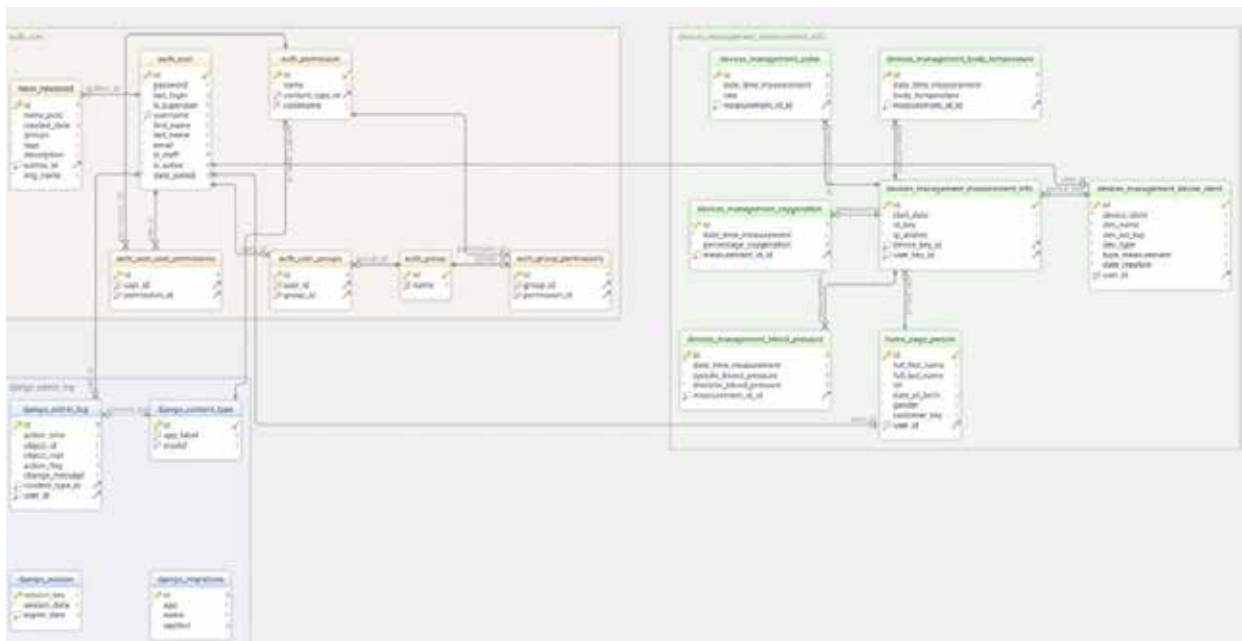


Рис. 4. Структура БД наведеної системи моніторингу стану здоров'я людини

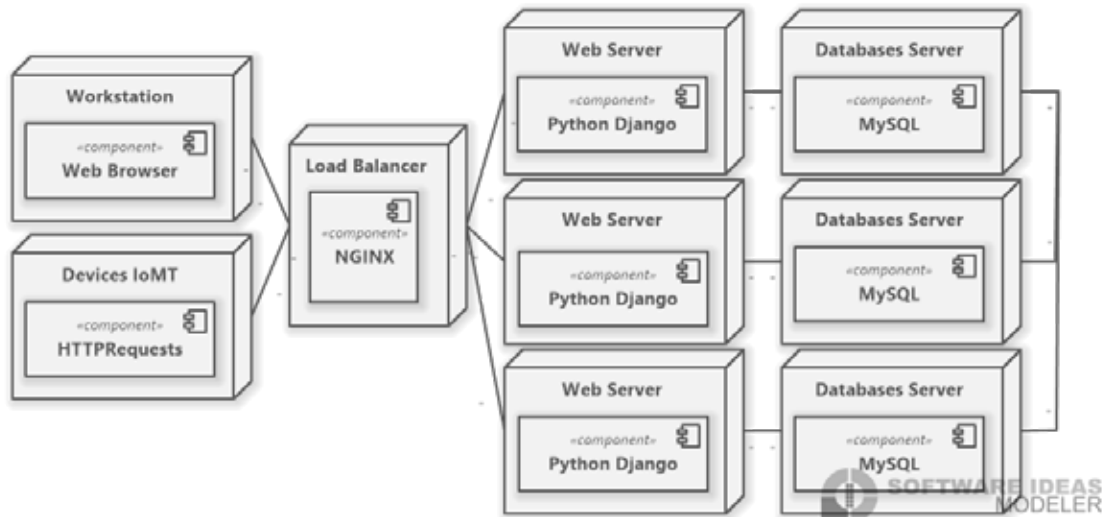


Рис. 5. Структура системи моніторингу стану здоров'я людини

основні компоненти: балансувач навантаження, вебсервери, що можуть працювати паралельно для обробки великої кількості запитів та кілька серверів БД (рис. 5).

Висновки. Виконано дослідження сучасних концепцій, на основі яких будуються системи моніторингу стану здоров'я. Представлено багаторівневу архітектуру для побудови зазначених

систем з підтримкою можливості паралельної обробки запитів. Розроблено інформаційну технологію для збору, зберігання та відображення даних стану здоров'я людини на основі мови програмування Python та фреймворку Django.

У подальшому планується інтеграція до розробленої системи засобів статистичного аналізу та методів ШІ для обробки отриманих даних.

Список літератури:

- 1) Ren Z., Wang W., Wu G. Migrating web applications from monolithic structure to microservices architecture. Proceedings of the 10th Asia-Pacific Symposium on Internetware(2018). P. 1–10.
- 2) Vicente A., Etcheverry L., Sabiguero A. An RDBMS-only architecture for web applications. 2021 XLVII Latin American Computing Conference (CLEI)(2021). P. 1–9.
- 3) Марценюк В. П., Качур І. В., Сверстюк А. С. Моніторинг стану здоров'я за функціональними показниками за допомогою сенсорів у реабілітаційній медицині: систематичний огляд. Вісник наукових досліджень. Том 2. С. 5–12.
- 4) Лирчиков В. О., Байбуз О. Г. ОГЛЯД СУЧАСНИХ МЕДИЧНИХ ІНФОРМАЦІЙНИХ СИСТЕМ. Актуальні проблеми автоматизації та інформаційних технологій. Том. 25, 2021. С. 103–107.
- 5) Хвищун А. І., Качмар В. О. Принципи формування єдиної медичної інформаційної системи великого міста. Medical Informatics and Engineering. Том 3. С. 39–47.
- 6) Шевченко К. Л., Склярєвський А. О. Принципи побудови систем моніторингу стану здоров'я людини. Мехатронні системи: інновації та інжиніринг(2021). С. 186–187.
- 7) Razdan S., Sharma S. Internet of medical things (IoMT): Overview, emerging technologies, and case studies. IETE technical review. Vol. 39, Issue 4. P. 775–788.
- 8) Ziogas A. N., Schneider T., Ben-Nun T. Productivity, portability, performance: data-centric Python. Proceedings of the International Conference for High Performance Computing, Networking, Storage and Analysis(2021). P. 1–13.
- 9) Mele A. Django 3 By Example: Build powerful and reliable Python web applications from scratch. Packt Publishing Ltd, 2020. 533 p.

Honcharov D.S., Honcharova N.V., Kandyba I.O. ARCHITECTURE OF A MULTI-LEVEL HUMAN HEALTH MONITORING SYSTEM

The article studies the peculiarities of multi-level architecture implementation of a system for human health state monitoring. Thus, modern researches of medical systems are analysed, the purpose and basic functionality of these systems are determined. The peculiarities of the collecting data process for monitoring the human condition and the features of implementing this process are considered. Moreover, a conceptual model of a

multi-level architecture for implementing the functions of a human health monitoring system is presented. A description of the Internet of Medical Things (IoMT) concept used in the modern world to implement the functions of human health monitoring is given. In addition, the main data transmission protocols used by IoMT devices are defined. A schematic model of data transfer between applications and IoMT devices is presented, and the features of the application of this concept are described. The capabilities of the Python language in the context of developing a multi-level human health monitoring system are analysed. The possibility of using Django tools to create a multi-level architecture of an information system is considered. Thus, the paper includes a description of the possibility of using the Django Template Language to implement the human health monitoring system presentation level. The possibility of visualising the collected data using the Google Chart toolkit is analysed. Also, the opportunity of using Object Relational Mapping tools to implement the data layer of the developed system is described. The most appropriate database management system is determined, which allows to implement data replication and supports the ability to work with a large amount of data. A description of the structure of the human health monitoring system using a load balancer and several separate servers to implement the logic level is given. The ways of further development of a multilevel system for monitoring the state of human health are proposed.

Key words: *IoMT, Python, Django, multi-level architecture, MySQL.*

УДК 004.5

DOI <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2024.2/12>**Дьячук Т.С.**

Національний університет «Запорізька політехніка»

Шкрябець В.І.

Національний університет «Запорізька політехніка»

Тіменко А.В.

Національний університет «Запорізька політехніка»

Голуб Т.В.

Національний університет «Запорізька політехніка»

АВТОМАТИЗОВАНА СИСТЕМА ГЕНЕРАЦІЇ ЗАВДАНЬ В НАВЧАЛЬНИХ КУРСАХ З ПРОГРАМУВАННЯ

Наразі дистанційна освіта стала практично єдиною можливістю отримати знання, спочатку через пандемію COVID-19, а згодом через повномасштабну війну в Україні, особливо у прифронтових містах. Стаття присвячена вирішенню практичної задачі розробки автоматизованої системи генерації завдань студентів при навчанні програмуванню, яка допоможе викладачу організувати ефективний та якісний навчальний процес в умовах дистанційної освіти, часто асинхронний через воєнний стан. Система дозволяє надати студентам різноманітні завдання, заощадити час викладача та отримати більш об'єктивну оцінку знань студентів, оскільки кожен отримує унікальне завдання. Галузь використання системи – університети, заклади освіти та компанії, що мають курси з навчання програмуванню. Розроблювана система є частиною більш складної системи для дистанційної освіти, тому згенеровані завдання придатні для подальшої автоматизованої перевірки та мають чітко визначену специфікацію. Для досягнення поставленої мети було: проведено аналіз публікацій за темою автоматизованого навчання, спроектовано, розроблено та реалізовано автоматизовану систему генерації завдань, впроваджено її у навчальний процес в рамках дисципліни «Основи програмування на Kotlin». Розроблена система охоплює різні теми навчання. Спочатку викладачу потрібно зробити базове завдання, та певний набір підзавдань, з яких буде формуватися варіативність результуючого завдання, для кожної теми навчання. Отримані результуючі завдання залежать від ідентифікатора студента, для перетворення якого використовується хеш-функція, що гарантує унікальність результуючого варіанту завдання з кожної теми. Для реалізації системи використані: мова Kotlin для розробки системи, система автоматизації збірки Gradle, середа розробки IntelliJ Idea, система керування версіями файлів Git, GitHub – репозиторій для вихідного коду. Система генерації в скомпільованому виді викладена у GitHub репозиторій та доступна студентам у формі бібліотеки, яку можна підключити до своїх проєктів та використовувати при вивченні навчального матеріалу. Бібліотека зроблена у вигляді Maven артефакту. Робота над системою продовжується, репозиторій постійно оновлюється, виправляються помилки, та система поліпшується.

Ключові слова: GitHub, Kotlin, LaTeX, MD5, Gradle, Maven артефакт, хеш-функція, дистанційна освіта.

Постановка проблеми. У сучасному світі вміння програмувати є дуже корисною навичкою, особливо для студентів технічних спеціальностей. Воно сприяє розумінню технологій, розвиває творчість, критичне та проблемно-орієнтоване мислення, відкриває нові можливості для майбутньої кар'єри.

На даний час дистанційна освіта стала практично єдиною можливістю отримати знання, спочатку через пандемію COVID-19, а згодом через

повномасштабну війну в Україні, особливо у прифронтових містах. Але в цілому вона стає доволі популярною сама по собі у контексті сучасних технологій, та надає багато переваг для студентів у зручному та ефективному способі отримання освіти. Вона дозволяє студентам навчатися зручно та безпечно, обираючи режим, який підходить їм найкраще. Однією з ключових інновацій в цій сфері є автоматична генерація та перевірка завдань. У цій статті приділено увагу саме генера-

ції завдань, які в подальшому можливо перевіряти завдяки автоматизованій системі перевірки.

Процедурна генерація завдань – це процес автоматичного створення завдань або тестів з використанням алгоритмів та програмного забезпечення. Цей підхід використовується в багатьох галузях, включаючи освіту, наукові дослідження та інженерію програмного забезпечення. У навчальних курсах з програмування генерація завдань може бути корисною для автоматичного створення індивідуальних завдань на основі рівня знань кожного студента. Завдяки такому підходу, викладачі можуть надати студентам різноманітні завдання, заощадити час та зосередитися на навчанні і оцінюванні результатів. Це також дозволяє отримати більш об'єктивну оцінку знань, оскільки кожен отримує унікальне завдання. Однак, при процедурній генерації завдань необхідно враховувати різноманітні фактори, такі як рівень складності, обсяг та якість згенерованих завдань, а також їх придатність для оцінювання знань.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Останні дослідження та публікації за цією темою свідчать про високу актуальність та перспективність систем дистанційної освіти у тому числі при навчанні програмуванню. Наприклад, автори статті [1] прийшли до висновку, що хоча студенти і висловлювали негативне ставлення до автоматизованої системи, але автоматичне машинне оцінювання для навчання програмуванню краще готує студентів до ситуацій, коли їм доводиться писати код самостійно, усуваючи залежність від зовнішніх джерел допомоги та мотивуючи розвиток самодостатності. У роботі [2] автори розглядають можливість використовувати OpenAI Codex як велику мовну модель при створенні вправ з програмування (включаючи приклади розв'язків та тести) та поясненні коду для вступного навчання програмуванню. Дослідження вказують на значну цінність масштабних моделей машинного навчання як інструмента для викладачів, хоча і є потреба в контролі якості згенерованого контенту перед його передачею студентам. У статті [3] розроблена система 2TSW, яка спрямована на покращення навчання програмуванню шляхом автоматизованої корекції завдань із можливістю отримання зворотного зв'язку. Ця система використовує ігровий підхід, що дозволяє студентам отримувати бали досвіду та підвищує їхню мотивацію через змагальний елемент. Результати експерименту показали, що студенти високо оцінюють систему та підтримують високий рівень зацікавленості.

Отже, на даний момент існує безліч систем, розробок та підходів до автоматизованого навчання, тому ми вважаємо цю тему затребуваною, актуальною та такою, що потребує подальших досліджень.

Постановка завдання. Метою статті є розробка автоматизованої системи генерації завдань студентів при навчанні програмуванню, яка допоможе викладачу організувати ефективний та якісний навчальний процес в умовах дистанційної освіти, часто асинхронний через воєнний стан. Розроблювана система є частиною більш складної системи для дистанційної освіти, тому згенеровані завдання повинні відповідати певним критеріям та мати чітко визначену специфікацію для подальшої автоматизованої перевірки.

Виклад основного матеріалу. Розглянемо етапи, з яких складається наша система генерації завдань (рис. 1). Спочатку береться унікальний ідентифікатор студента – рядок символів (наприклад логін), що гарантує унікальність результуючого варіанту завдання. Далі хеш-функція перетворює цей ідентифікатор в дані фіксованого розміру – ланцюжок байтів. У якості алгоритму хешування було обрано алгоритм MD5. Хоча MD5 вважається застарілим і вразливим, для наших цілей він підходить, адже генерація завдань не потребує високого рівня рандомізації на відміну від задач пов'язаних з кібербезпекою, а у JVM MD5 можна використовувати для створення хеш-кодів за допомогою вбудованих бібліотек та класів.

Викладачу потрібно зробити базове завдання, та певний набір підзавдань, з яких буде формуватися варіативність результуючого завдання, для кожної теми навчання. Тему навчання задає ідентифікатор теми – натуральне число (порядковий номер теми). Ідентифікатор теми навчання визначає яке саме базове завдання буде обрано та принцип, за яким будуть формуватися підзавдання (який набір вправ буде використано та які байти з ланцюжку будуть впливати на вибір конкретних підзавдань з обраної теми).

Далі формується структура завдання з базового завдання та набору підзавдань, яка буде використовуватися в подальшому для автоматичної перевірки результатів роботи студента. А для зручності сприйняття структура завдання перетворюється у текстовий формат, який вже отримує студент для виконання. Таким чином, кожен студент отримує унікальне завдання.

Для прикладу розглянемо формування завдання з теми «Змінні та типи даних, рядки,

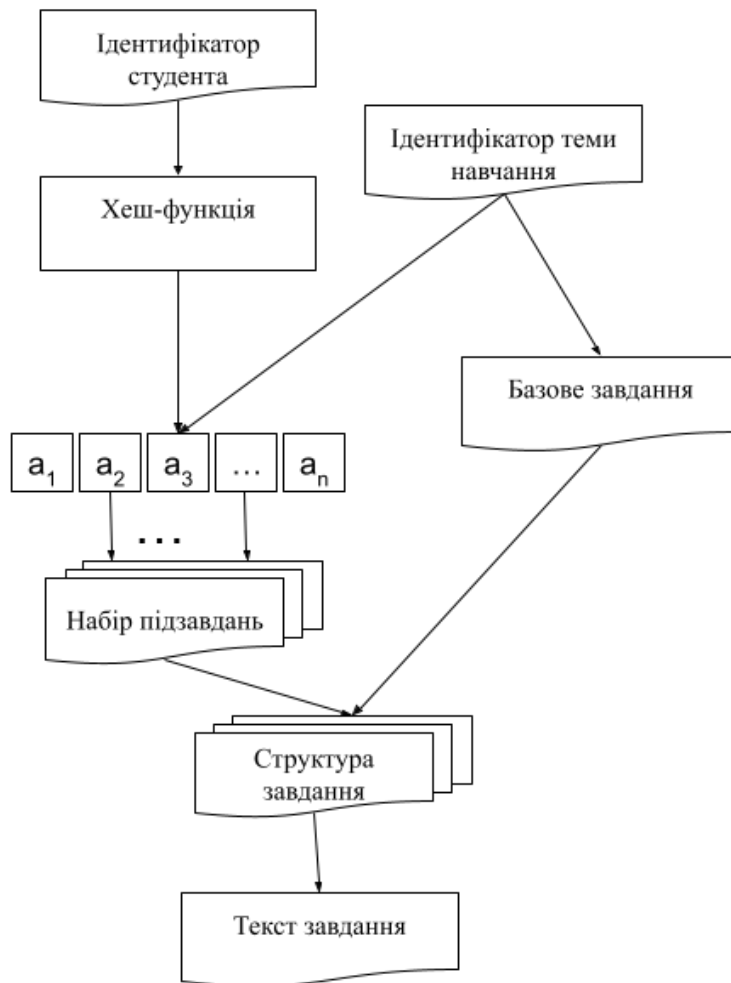


Рис. 1. Етапи генерації завдань

умови та цикли, функції» для дисципліни «Основи програмування на Kotlin». Зазначимо, що Kotlin [4] – сучасна статично типізована, об'єктно-орієнтована мова програмування, яка працює поверх JVM. Може застосовуватися для розробки застосунків у багатьох проблемних областях. Система генерації завдань також розроблена на мові Kotlin [4] з використанням середовища розробки IntelliJ IDEA [5].

Розглянемо приклад опису завдання у лістингу 1. Ця структура містить чотири поля даних: `digest` – масив байтів, отриманий хеш-перетворенням ідентифікатора студента. Від нього залежить варіативна частина, тому воно є обов'язковим для всіх завдань; `intTask` – завдання за темою «функції та операції з цілими типами даних»; `doubleTask` – завдання за темою «функції та операції з типами даних з плаваючою комою»; `stringTask` – завдання за темою «функції та операції з рядками».

Лістинг 1. Структура з описом загального завдання

```

1. data class TaskL2(
2.     val digest: ByteArray,
3.     val intTask : BaseTask<Int>,
4.     val doubleTask : BaseTask<Double>,
5.     val stringTask : StringTask,
6. ) : Task()
  
```

У лістингу 2 наведено обчислення значення `digest` за значенням ідентифікатора студента `seedStr`.

Лістинг 2. Обчислення значення `digest`

```

1. val seed = seedStr.toByteArray(Charset.forName("UTF-8"))
2. val md = MessageDigest.getInstance("MD5")
3. val digest = md.digest(seed)
  
```

В першому рядку ми перетворюємо рядковий ідентифікатор студента в масив байтів. Наступ-

ним кроком використовуємо бібліотечний клас MessageDigests та розраховуємо MD5 хеш від масиву байт.

На прикладі intTask (з лістингу 1) розглянемо як відбувається формування завдання за значеннями з digest. В цьому завданні студенту потрібно написати функцію, яка має провести обчислення за певними вхідними даними та повернути результат обчислень. Загальна формула для такого завдання буде наступною:

$$res = mainFnc(secondaryFnc(x_0, x_1, \dots)), \quad (1)$$

– mainFnc – головна функція над вхідними аргументами. Можливі варіанти: квадратний корінь (має ідентифікатор функції 0), кубічний корінь (ідентифікатор 1), косинус (ідентифікатор 2), тангенс (ідентифікатор 3), синус (ідентифікатор 4), тангенс гіперболічний (ідентифікатор 5), логарифм натуральний (ідентифікатор 6). Ідентифікатор функції обирається за формулою ($min=0$, $max=6$ – для цього випадку):

$$mainFncIndex = |digest_1| \% (max - min) + min; \quad (2)$$

– secondaryFnc – вторинна функція над вхідними аргументами. Можливі варіанти: сума (ідентифікатор 0), сума квадратів (ідентифікатор 1), сума кубів (ідентифікатор 2), мінімальне (ідентифікатор 3), максимальне (ідентифікатор 4), сума модулів (ідентифікатор 5), модуль мінімального (ідентифікатор 6), модуль максимального (ідентифікатор 7), множення (ідентифікатор 8), функція обирається за формулою ($min=0$, $max=7$ – для цього випадку):

$$secondFncIndex = |digest_2| \% (max - min) + min; \quad (3)$$

– x_0, x_1, \dots – вхідні аргументи.

Після розрахунку значення digest система формує структуру за кожною темою з описом окремого завдання. Для нашого приклада (intTask) структуру наведено в лістингу 3. В цьому завданні студенту потрібно написати функцію, яка має провести обчислення за певними вхідними даними та повернути результат.

Лістинг 3. Структура з описом окремого завдання

```
1. data class BaseTask<T>(
2.     val cnt: Int,
3.     val defValues: List<T>,
4.     val mainFnc: MainFunctions,
5.     val secondFnc: SubFunctions,
6. )
```

Отже структура окремого завдання містить наступні поля даних:

– cnt – кількість вхідних аргументів в межах від $min=2$ до $max=5$, розраховується за формулою (4):

$$cnt = |digest_0| \% (max - min) + min. \quad (4)$$

– defValues – вхідні аргументи (значення за замовченням для функції):

$$defValues_i = digest_i. \quad (5)$$

– mainFnc та secondFnc відповідають загальній формулі (1).

Наступним кроком буде створення тексту завдання. Воно формується з попередньої структури (лістинг 3) та має бути зрозумілим для сприйняття студентами. Чітко сформульовані завдання зменшують можливість непорозумінь та покращують якість виконаної роботи. Формули завдання відображаються в графічному вигляді, для цього блок генерації завдання використовує технологію LaTeX, яка надає потужні засоби для написання складних математичних формул, що дозволяє зробити їх зрозумілими та естетично оформленими у документах.

Для перетворення структури BaseTask в текстове завдання спочатку беремо кількість аргументів з структури BaseTask, первинну та вторинну функцію. Потім формуємо опис формули за стандартом LaTeX. І далі на етапі відображення графічного інтерфейсу перетворюємо LaTeX формулу в растрове зображення за допомогою бібліотеки jlatexmath [6].

На рис. 2 наведено текст сформованого завдання, яке отримує студент. Воно відповідає класу даних з лістинга 1. Завдання складається з трьох частин (intTask, doubleTask, stringTask) і відповідно має три вкладки. Для першої частини завдання (intTask) число змінних, значення за замовченням та вигляд функції є варіативними та залежать від ідентифікатора студента. Базовою є умова створити функцію з певним типом та назвою. Друга та третя частини завдання (doubleTask, stringTask) також мають базові та варіативні умови.

Система генерації в скопійованому виді викладена у GitHub репозиторій та доступна студентам у формі бібліотеки, яку можна підключати до своїх проєктів та використовувати при вивченні навчального матеріалу. Git та GitHub є дуже потужними інструментами для контролю версій та спільної роботи над проєктами. Бібліотека зроблена у вигляді Maven артефакту [7]. Для підключення бібліотеки в навчальних проєктах потрібно у конфігураційний файл власного проєкту (build.

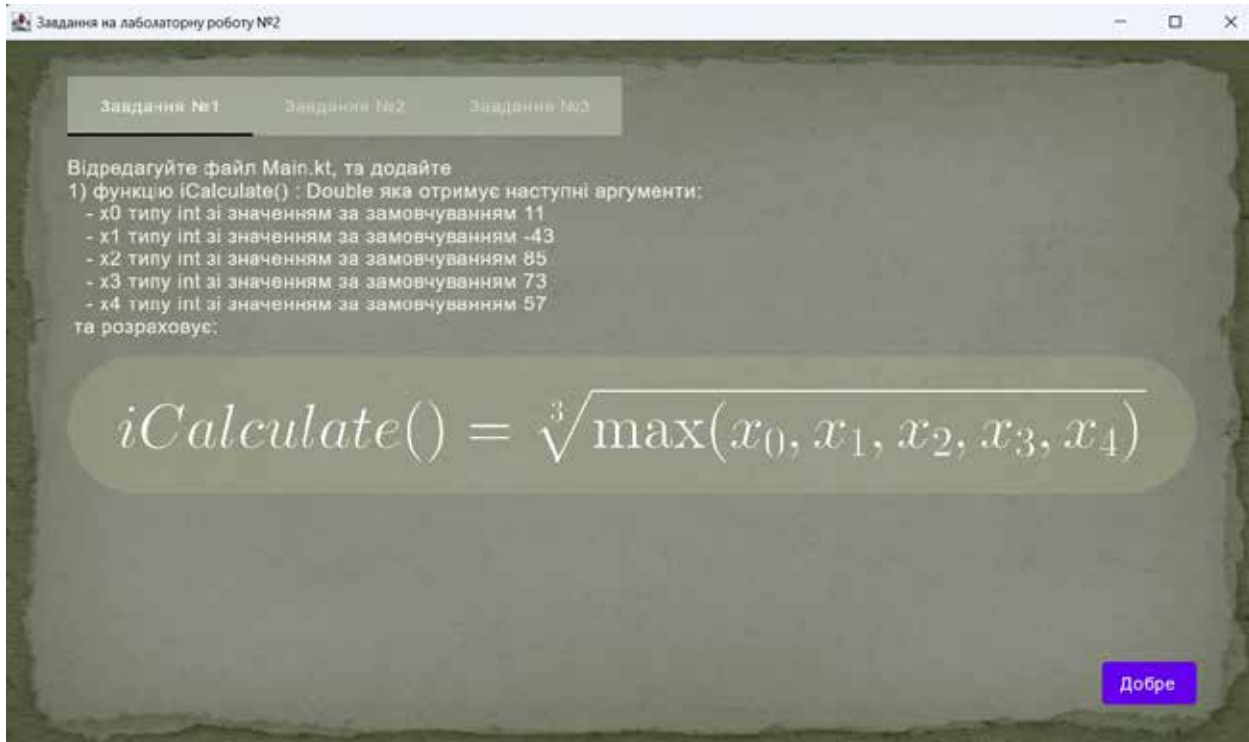


Рис. 2. Текст сформованого завдання

gradle) додати шлях до репозиторію з Maven артефактами, та увімкнути залежність від com.diacht.ktest:library бібліотеки (що представлено у лістингу 4, де "com.diacht.ktest:library:1.0.7" – поточна версія бібліотеки).

Лістинг 4. Підключення бібліотеки з системою генерації завдань у конфігураційний файл build.gradle

```

1. repositories {
2.     maven("file://${rootDir}/.m2repo/")
3.     ...
4. }
5. dependencies {
6.     implementation("com.diacht.ktest:
7.         library:1.0.7")
8.     ...
9. }

```

Висновки. Таким чином, автоматична генерація та перевірка завдань студентів у навчальних курсах з програмування може значно спростити процес викладання та оцінювання рівня знань студентів. Цей підхід дає змогу автоматизувати багато аспектів навчання та забезпечити об'єктивне оцінювання.

Розроблена система дозволяє надати студентам різноманітні завдання, заощадити час викладача та отримати більш об'єктивну оцінку знань студентів, оскільки кожен отримує унікальне завдання. Галузь використання системи – університети, заклади освіти та компанії, що мають курси з навчання програмуванню.

Систему автоматизованої генерації завдань було розроблено, впроваджено та апробовано у рамках дисципліни «Основи програмування на Kotlin», вона охоплює різні теми навчання та має унікальні завдання з кожної теми, які залежать від унікального ідентифікатора студента. Розроблена система є частиною більш складної системи для дистанційної освіти, тому згенеровані завдання придатні для подальшої автоматизованої перевірки та мають чітко визначену специфікацію. Система в скомпільованому виді викладена у GitHub репозиторій та доступна студентам у формі окремої бібліотеки, що приєднується до системи збірки Gradle. Робота над системою продовжується, репозиторій постійно оновлюється, виправляються помилки, та система поліпшується.

Список літератури:

1. Maguire Ph., Maguire R., Kelly R. Using automatic machine assessment to teach computer programming, Computer Science Education, 2017, Vol. 27, Issue 3-4, P. 197-214, URL: <https://doi.org/10.1080/08993408.2018.1435113> (date of access: 13.02.2024).

2. Sami Sarsa, Paul Denny, Arto Hellas, Juho Leinonen. 2022. Automatic Generation of Programming Exercises and Code Explanations Using Large Language Models. In Proceedings of the 2022 ACM Conference on International Computing Education Research V.1 (ICER 2022), August 7–11, 2022, Lugano and Virtual Event, Switzerland. ACM, New York, NY, USA, 17 pages. URL: <https://doi.org/10.1145/3501385.3543957> (date of access: 14.02.2024).

3. Giuseppina Polito, Marco Temperini. A gamified web based system for computer programming learning, Computers and Education: Artificial Intelligence, 2021, Vol. 2, P. 100029, URL: <https://doi.org/10.1016/j.caeai.2021.100029> (date of access: 27.02.2024).

4. Pierre-Yves Saumont. The Joy of Kotlin: Manning Publications, 2019 – 480p.

5. IntelliJ IDEA. URL: <https://www.jetbrains.com/idea> (date of access: 16.02.2024).

6. jlatexmath. URL: <https://github.com/opencollab/jlatexmath> (date of access: 26.02.2024).

7. Diacht/KotlinLabsNUZP – Maven репозиторій. URL: <https://github.com/Diacht/KotlinLabsNUZP/tree/main/.m2repo/com/diacht/ktest/library> (date of access: 01.03.2024).

Diachuk T.S., Shkriabets V.I., Timenko A.V., Holub T.V. AUTOMATED SYSTEM OF TASKS GENERATION FOR THE PROGRAMMING COURSES

Currently, distance education has become almost the only opportunity to gain knowledge, first due to the COVID-19 pandemic, and later due to the full-scale war in Ukraine, especially in the frontline cities. The article is devoted to the solution of the practical task of developing an automated system for generating tasks for students that are computer science. This system should help the teacher organize an effective and high-quality educational process in the conditions of distance education, often asynchronous due to the war. The system provides students with a variety of generated tasks, save the teacher's time and get a more objective assessment of students' knowledge, since everyone receives a unique task. The field of use of the system is universities, educational institutions and companies that have programming training courses. The developed system is part of a more complex system for distance education, so the generated tasks are suitable for further automated verification and have a well-defined specification. To achieve the goal, the following was done: an analysis of publications on the topic of automated learning was carried out, an automated task generation system was designed, developed and implemented, and it was implemented in the educational process within the framework of the discipline "Fundamentals of Kotlin Programming". The developed system covers various learning topics. First, the teacher needs to make a basic task and a certain set of subtasks, from which the variability of the resulting task will be formed, for each topic of study. The resulting tasks depend on the student ID, which is converted using a hash function, which guarantees the uniqueness of the resulting assignment option for each topic. The following tools are used to implement the system: Kotlin language for system development, Gradle build system, IntelliJ Idea development environment, Git as version control system, and GitHub – repository for source code. The generation system in a compiled form is stored in the GitHub repository and is available to students in the form of a library that can be connected to their projects and used for studying educational material. The library is made in the form of a Maven artifact. Work on the system continues, the repository is constantly updated, errors are corrected, and the system is improved.

Key words: *GitHub, Kotlin, LaTeX, MD5, Gradle, Maven artifact, hash function, distance education.*

Єремєєв І.С.

Таврійський національний університет імені В.І. Вернадського

Дичко А.О.

Таврійський національний університет імені В.І. Вернадського

Мінаєва Ю.Ю.

Таврійський національний університет імені В.І. Вернадського

ЗАСТОСУВАННЯ ТЕОРІЇ КАТАСТРОФ ПРИ ДОСЛІДЖЕННІ НАСЛІДКІВ ПІДРИВУ КАХОВСЬКОЇ ГЕС ТА ВІЙСЬКОВИХ ДІЙ У КРИМУ

У даній роботі представлений підхід до дослідження екологічних катастроф внаслідок руйнування Каховської ГЕС на основі елементів теорії катастроф. Метою дослідження є аналіз передумов екологічних катастроф та наукове обґрунтування методології дослідження екологічних катастроф на основі елементів теорії катастроф. Наведено попередній аналіз впливу руйнувань та затоплень, що відбулися через підриг Каховської ГЕС та військові дії у Криму, на екосистеми. Відновлення довкілля регіону вимагає розробки плану природоохоронних заходів, які будуть реалізовані після деокупації захоплених ворогом теренів та припиненням військових дій, з урахуванням природних міграцій та метаболізмів. Зазначено, що екологічні катастрофи характеризуються складними нелінійними залежностями функцій, що їх описують, від параметрів. Такі залежності можна представити у термінах теорії катастроф, що дозволяє моделювати екологічну катастрофу і передбачати можливі її наслідки та шляхи їх мінімізації. Представлено метод моделювання якісного опису динаміки процесу шляхом застосування ряду Тейлора та оцінки критичних точок функції поведінки системи. Значення типу катастрофи або його вибір з ряду альтернативних типів дозволяє підвищити достовірність оцінок інформації в умовах невизначеності, коли частка даних, яких бракує, може бути відновлена на підставі поліному, який описує катастрофу, а «сумнівні» дані підтверджуються як достовірні, якщо вони узгоджуються з описом катастрофи. При розгляданні особливостей катастроф та вирішенні проблеми ідентифікації особливості катастрофи для пояснення «хаотичних» явищ і побудови адекватних моделей запропоновано використовувати метод інваріантного занурення. Розроблений підхід дозволяє підвищити достовірність оцінок інформації в умовах неповних даних, які описують катастрофу.

Ключові слова: екологічна катастрофа, екосистеми, теорія катастроф, ідентифікація стану, метод інваріантного занурення.

Постановка проблеми. Відомо, що катастрофи відбуваються як завдяки природним явищам (природні катастрофи), так в наслідок діяльності людини, тобто носять техногенний (або антропогенний) характер (Рис. 1). Природні катастрофи обумовлені збігом несприятливих обставин, які «запускають» механізм біфуркації і переводять конкретну локальну систему у нестабільний стан.

Інакша справа з техногенними катастрофами. Їхніми причинами можуть бути наступні чинники:

- Людський фактор;
- Процеси старіння компонентів систем;
- Невдалі конструкції;
- Вплив зовнішніх чинників (природних або антропогенних);

- Невідпрацьована технологія;
- Відсутність адекватних знань;
- Військові та терористичні дії.

Аналіз останніх досліджень і публікацій.

«Монументальною катастрофою» назвав підриг росіянами Каховської ГЕС Генеральний секретар Організації Об'єднаних Націй А. Гуттеріш, і наголосив, що це «ще один руйнівний наслідок російського вторгнення в Україну». Великі повені, підтоплення більше 80 населених пунктів, спустошення навколишнього середовища, знищення екосистем – це лише частина наслідків катастрофи. Внаслідок руйнування ГЕС у воду (за даними «Укргідроенерго») потрапило 450 т машинного мастила з трансформаторів станції. Крім того, із затопленої території до води потрапили небез-

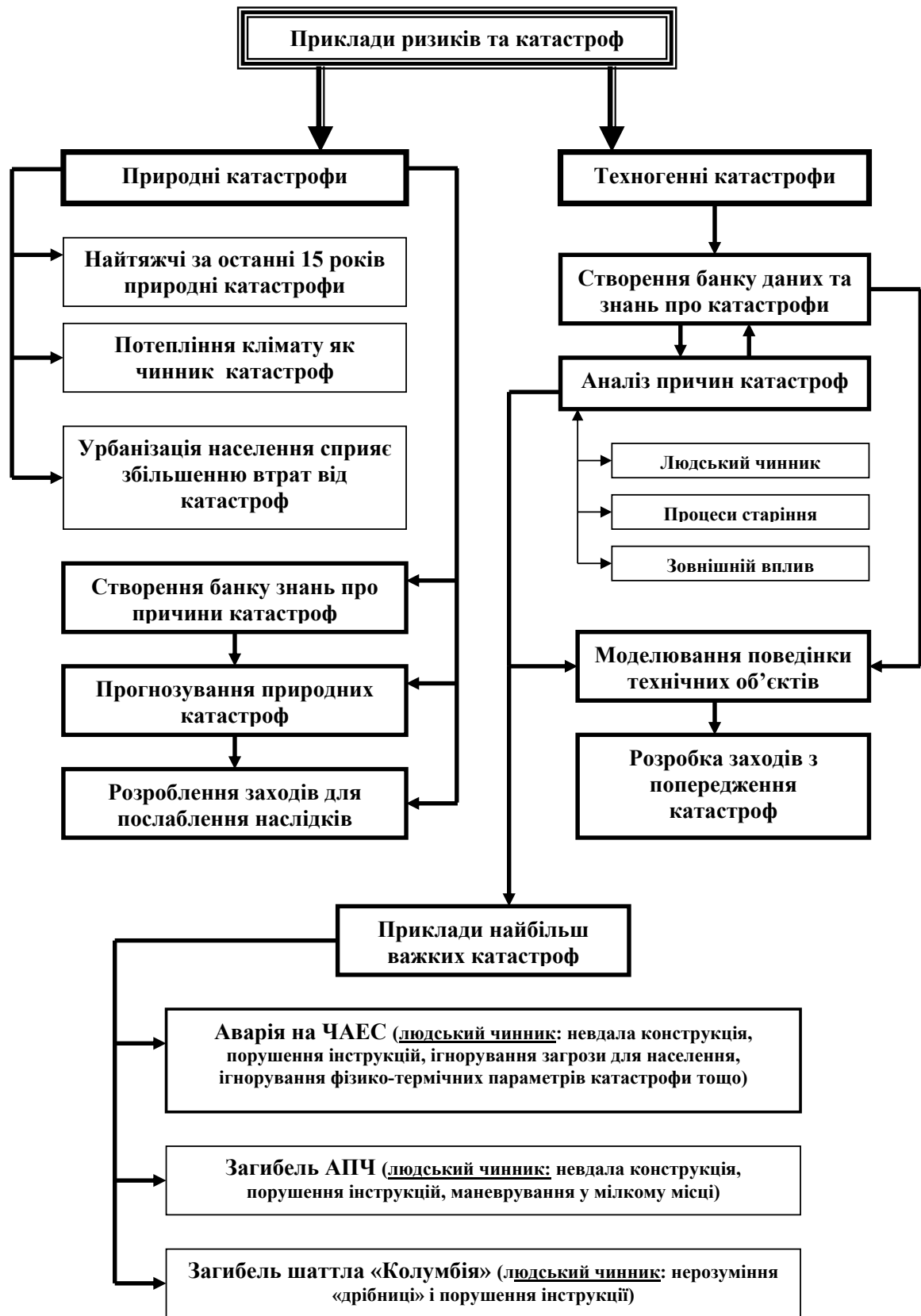


Рис. 1. Ризики, катастрофи та їх подолання

печні токсичні речовини, важкі метали, паливно-мастильні матеріали, пестициди тощо зі складів, промислових і сільськогосподарських підприємств, сміттєзвалищ, каналізації [1]. Відбувається також так зване «вторинне забруднення», що виникає внаслідок порушення шарів намулу, в яких десятиліттями відбувалось накопичення забруднюючих речовин. Затоплені значні території, що зазнали впливу військових дій. Згідно аналітичного звіту фахівців Національного університету біоресурсів і природокористування України, внаслідок цього у поверхневій воді із залишків боєприпасів чи в результаті вибухів потрапили сполуки, які мають токсичну дію для біологічних організмів: нітроцеллюлоза, нітрогліцерин, нітрогуанідин, дібутилфталат, динітротолуол, каніфоль, етилацетат, стронцій азотнокислий, порошок магнієвий, порошок алюмінієво-магнієвий, магній вуглекислий, полівінілхлорид, стронцій вуглекислий, смола, свинцевий сурик, феросиліцій, залізо, бор технічний, графіт, гримуча ртуть $\text{Hg}(\text{ONC})_2$, антимоній Sb_2S_3 (сурма трьохсірчаниста), бертолетова сіль KClO_3 (калій хлорат) [1]. Необхідне дослідження шляхів метаболізмів цих речовин, перетворення їх на небезпечні сполуки та виведення з екосистеми.

Екологічна катастрофа полягає також у безповоротно знищеному біорізноманіттю водної екосистеми і прилягаючої території. Осушений ландшафт водосховища буде піддаватися вітровій ерозії. Цей факт потребує особливої уваги, враховуючи перенос й відкладення радіоактивних чорнобильських опадів у дніпровських водосховищах. Зміниться гідрологічний режим прибережної території, втрачено рідкісні види флори. Загинуть усі живі організми, що мешкають у товстому шарі мулу. Після спуску води чаша водосховища заростає рудеральною рослинністю, а це насамперед агресивні види типу амброзії, золотушника канадського та інших бур'янів. До Чорного моря, крім сміття, потрапила значна кількість прісної води, що разом із токсичними речовинами викличе певні зміни в екосистемі. За даними Українського Інституту Майбутнього, вище греблі Каховської ГЕС, у результаті осушення, постраждає також ціла низка природоохоронних територій, зокрема мінімум 11 об'єктів природно-заповідного фонду. Окрім того, на цій території існують природоохоронні території міжнародного значення. Наслідки теракту негативно вплинуть на території Смарагдової мережі UA0000106 Kakhovske Reservoir (218119 га) та Velykyi Luh National Nature Park (SiteCode: UA0000037) (16755,00 га), водно-

болотні угіддя міжнародного значення Архіпелаг Великі і Малі Кучугури (7740,0 га), Заплава Сім Маяків (2140,0 га) [2].

Переважна більшість всіх природних територій, що знаходяться в зоні затоплення, входять до складу природно-заповідного фонду. За розрахунками Українського Інституту Майбутнього, внаслідок підтоплення повністю або частково постраждає 48 об'єктів природно-заповідного фонду, в тому числі: 1 біосферний заповідник; 3 національні природні парки, 1 регіональний ландшафтний парк, 16 заказників, 3 заповідні урочища, 22 пам'ятки природи, 2 парки-пам'ятки садово-паркового мистецтва. Слід зазначити, що територія Чорноморського біосферного заповідника охороняється з 1927 року, а сам він є частиною всесвітньої мережі біосферних резерватів ЮНЕСКО. Загальна площа підтоплених заповідних територій може перевищити 120 000 гектарів. Ще 22 території природно-заповідного фонду в зоні затоплення перебувають у процесі створення.

Надалі масштаби руйнувань будуть стрімко зростати, адже швидка течія на фарватері під високим правим берегом Дніпра підмиватиме низку природно-заповідних територій, розміщених вздовж берега. Це означатиме абразію високих берегів вже в перші дні після початку затоплення і продовження ерозії у майбутньому.

Затоплена територія повністю або частково включає 7 об'єктів Смарагдової мережі Європи, створених рішеннями Ради Європи з 2009 по 2020 рік. Втрата природних особливостей цих територій ставить під загрозу виконання Україною взятих нею зобов'язань щодо збереження цих територій для всієї Європи. Крім того, до територій важливих для збереження птахів (угіддя ІВА) віднесені Козацькі острови площею 1000 га [2].

В глобальному аспекті можливим наслідком є додаткова емісія парникових газів на затоплених ділянках внаслідок процесів гниття рослин, дерев. Крім того, відбувається зміна мезоклімату території через зміну площі поверхні водного дзеркала, зміну водного балансу території та збільшення відкритих ділянок суші.

Внаслідок окупації та військових дій у Криму Україна передусім матиме величезну екологічну проблему у вигляді засолених ґрунтів півострова, які вже зараз непридатні для ведення сільського господарства. Через відсутність водопостачання з Північнокримського каналу, її почали багато видобувати з підземних джерел. Крім того, великі військові бази та Кримський міст, збудовані оку-

пантами, також сильно вплинули на екосистеми, зокрема Азовського моря. Стихійні сміттєзвалища окупованого Криму, частина яких разом з неочищеними стічними водами потрапляє безпосередньо до Чорного моря, викликають незворотні зміни в екосистемі водойми.

Громадське об'єднання «КримSOS» та експерти-екологи у своєму дослідженні «Довкілля Криму: зміни і втрати за час окупації» відмічають техногенну катастрофу, яку охрестили «кримським Чорнобилем», що сталася восени 2018 року в Армянську, через потужний викид кристалічного сірчистого ангідриду [3]. Токсичний газ розповсюдився за допомогою вітру. Найвіддаленіша точка, де вдалося зафіксувати викид, – Херсонська область, на відстані 120 км. Високі концентрації сірчаної кислоти в повітрі викликають у людини задишку, можуть призвести до непритомності. На рослини вона розповсюдилася, коли вранці випала роса. Людей евакуювали лише через тиждень, але потім упродовж декількох днів повернули назад. Мешканці найближчих селищ не могли дихати, всі залізні елементи вмить заржавіли, асфальт зруйнувався, всі дерева, рослини та огороди висохли.

Постановка завдання. Метою статті є аналіз передумов екологічних катастроф та наукове обґрунтування методології дослідження екологічних катастроф на основі елементів теорії катастроф.

Виклад основного матеріалу. Вивчення наслідків екологічних катастроф на основі елементів теорії катастроф. Екологічні катастрофи характеризуються складними нелінійними залежностями функцій, що їх описують, від параметрів [4-5]. Ці залежності, натомість, досить легко можна представити у термінах теорії катастроф, що дозволяє моделювати будь-яку екологічну катастрофу і передбачати можливі її наслідки та шляхи, спрямовані на їхню мінімізацію. Проте якщо природні катастрофи мають справи лише із проблемою усунення або мінімізації наслідків (у тому числі шляхом використання спеціальних проєктів, конструкцій та інших заходів з ухилення від дії природних катаклізмів), то катастрофи, обумовлені військовими діями (або тероризмом), мають ще одну складову – перешкоджання діям рятувальних служб. Проте і ця проблема може бути вирішена у термінах теорії катастроф.

Предметом теорії катастроф є вивчення залежності якісної природи рішень рівнянь від значень параметрів, які присутні у цих рівняннях. Таке вивчення пов'язано з рядом труднощів, і для

їхнього подолання звичайно необхідно зробити ряд послідовних припущень. Перш за все припускають, що система рівнянь, які описують стан об'єкту (процесу), не містить інтегралів і по суті являє собою множину рівнянь у частинних похідних. Потім приймається, що ця система рівнянь не містить просторових похідних будь-якого порядку і взагалі не залежить від просторових координат. Далі приймається, що спрощена на попередніх кроках система не містить похідних за часом вище, ніж першого порядку. При подальшому спрощенні вважається, що така система не тільки не залежить від часу, але й представляє собою певну градієнтну систему, яку можна чітко охарактеризувати з точки зору її станів рівноваги і залежності цих станів від керуючих параметрів. При цьому теорія катастроф зводиться до вивчення того, яким чином стани рівноваги потенційної функції змінюються під час зміни керуючих параметрів.

Якісний опис поведінки складної функції поблизу певної точки простору змінних стану може бути реалізований шляхом вивчення перших декількох членів її розкладання у ряд Тейлора у цій точці:

$$f(x) = f(0) + x_1 f'(0) + \left(\prod_{i=1}^2 x_i \right) f^2(0) + \dots, \quad (1)$$

де

$$f'(0) = \frac{\delta[f(x)]}{\delta x_1} \Big|_{x=0}; \quad (2)$$

$$f^2(0) = 0,5 \frac{\delta^2[f(x)]}{\delta x_1 \delta x_2} \Big|_{x=0}; \quad (3)$$

$$f^{(h)}(0) = \frac{1}{n} \frac{\delta^h[f(x)]}{\delta x_1 \delta x_2 \dots \delta x_n} \Big|_{x=0}, \quad (4)$$

де f – функція моделювання поведінки процесу, x – змінні (параметри процесу), δ – значення матриці Гесе для змінної, n – кількість членів розкладання ряду.

Для визначення локальних властивостей функції $f(x)$ немає необхідності розглядати постійний член цього розкладання. Головними критеріями тут є градієнт ∇f та визначник det_{ij} , де $1 \leq i, j \leq h$. Якщо $\nabla f \neq 0$, то якісна поведінка функції повністю визначається лінійними членами розкладання і решту членів ряду можна відкинути без втрати важливої інформації. Якщо $\nabla f = 0$, але $det_{ij} \neq 0$, то якісна поведінка функції цілком визначається квадратичними членами розкладання, а усі наступні члени ряду можна не враховувати. Нарешті, якщо $\nabla f = 0$ і $det_{ij} = 0$, важливе значення отримують

члени розкладання більш високого порядку, причому звичайно при малих значеннях x_i членами $\prod_{i=1}^{n+1} x_i$ порівняно з членом $\prod_{i=1}^n x_i$ нехтують і обмежуються розглядом лише n членів розкладання.

Однак, появлення збурення або «дефекту» може призвести до того, що ті чинники, які раніше не враховувалися, оскільки за «нормальних» обставин їхній вплив не виявлявся, обумовляють різку зміну в поведінці об'єкту (процесу) у певній області простору керуючих (збурюючі) впливів. Ці зміни і отримали назву катастроф, а особливості – критичних точок (КТ). Останні можуть бути двох типів: точки, в яких градієнт потенційної функції, яка описує стан системи (об'єкту), дорівнює нулю ($\nabla f = 0$), зветься ізольованими, виродженими або неморсовськими КТ; точки, в яких $\nabla f \neq 0$, зветься ізольованими, не виродженими або морсовськими КТ. Якщо розмірність керованого простору, який включає одну «погану» змінну та m параметрів, невелика ($k = 1+m \leq 5$) і не має особливих або симетричних обмежень на сімейство потенційних функцій, які описують стан системи (об'єкту), то можлива гладка заміна змінних, у якій потенційна функція V може бути представлена у розщепленому на неморсовську та морсовську складові вигляді:

$$V = cat(l, m) + \sum_{j=1+l}^n \lambda_j(c) y_j^2. \quad (5)$$

Тут $cat(l, m) = CG(l) + pert(l, m)$ – функція катастрофи, причому $CG(l)$ являє собою «паросток катастрофи» – неморсовську функцію l «поганої» змінної стану, де l – число вироджених власних значень, що характеризує члени ряду Тейлора, які залишилися і саме й визначають особливість; $pert(l, M)$ – збурення катастрофи; n – загальна кількість змінних стану системи y ; c – керуючі параметри; $\lambda_j(c)$ – власні значення матриці сталості V_{ij} , обчислені для стану рівноваги.

Методологія застосування підходу, який використовує результати теорії катастроф для підбирання кривої, яка описує (за даними фактичних вимірювань) стан системи (об'єкта) поблизу розривних функцій, полягає у наступному. На підставі експериментально отриманих даних визначаються параметри того гладкого перетворення координат, яке переводить залежність, що фактично спостерігається поблизу точки розриву $f(x_1, \dots, x_n)$, у стандартну («елементарну») катастрофу $f'(x'_1, \dots, x'_n)$. Ці параметри можуть бути обчислені, наприклад, для випадку двопараметричної задачі шляхом мінімізації функціоналу Φ :

$$\min_{a,b} = \sum_{i=1}^n \frac{\Phi(x_i, y_i, a, b)}{\delta\Phi / \delta y(x, y_i, a, b)}, \quad (6)$$

де $\Phi(x_i, y_i, a, b) = \Phi_0(x', y')$,

$$x' = a_0 + a_1 x + a_2 y + a_3 x^2 + a_4 xy + a_5 y^2 + \dots, \quad (7)$$

$$y' = b_0 + b_1 x + b_2 y + b_3 x^2 + b_4 xy + b_5 y^2 + \dots$$

Слід додати, що для опису з тією ж точністю експериментально спостереженої залежності за допомогою кусочно-гладких та неявних моделей необхідна більша кількість параметрів. Так, для квадратичної апроксимації гладкої функції необхідно три параметри, а для кусочно-квадратичної – сім (положення точки розриву і по три параметри для характеристики кривої ліворуч та праворуч від точки розриву), що свідчить про певні переваги методів теорії катастроф.

Значення конкретного типу катастрофи або його вибір з ряду альтернативних типів за принципом найбільшої правдоподібності (або за якимось іншими критеріями) дозволяє підвищити достовірність оцінок інформації в умовах неповних даних, коли частка даних, яких бракує, може бути відновлена на підставі поліному, який описує катастрофу, а «сумнівні» дані можуть бути або підтверджені як достовірні, якщо вони узгоджуються з описом катастрофи, або відхилені у протилежному випадку [6-8].

При розгляданні особливостей катастроф, а точніше, під час вирішення проблеми ідентифікації особливості (катастрофи) і використання результатів цієї ідентифікації для пояснення «хаотичних» явищ і побудови адекватних моделей приходиться врешті-решт зустрічатися з рішенням нелінійних задач з граничними умовами, які задаються у двох різних точках (поблизу катастрофи, де з одного боку межі функція описується за допомогою обраної моделі, а з іншого боку – за допомогою функції катастрофи). Такі задачі можна у деяких випадках вирішувати за допомогою методу *інваріантного занурення*, який являє собою методику перетворення цих двохточкових крайових задач, обчислювальні алгоритми для яких часто виявляються нестійкими, у задачі Коші, для яких існують стійкі числові методи, за допомогою відповідного набору змінних і методу функціональних рівнянь. Сутність методу зводиться до того, що з метою вивчення конкретного процесу останній занурюється у підходящий клас процесів більш загального характеру, для якого відомі методи рішення. Наприклад, конкретна функція f занурюється у сімейство F , яке являє собою деформацію функції f . Потім визначаються

відношення між властивостями елементів цього класу, які аналітично описують процеси, що розглядаються. Як напівгрупові змінні, тобто змінні, кожній упорядкованій парі яких на множині може бути поставлений у відповідність певний визначений елемент з тієї ж множини, причому бінарний закон, за яким здійснюється це відображення, має, якнайменше, властивість асоціативності, можна використати замість класичної змінної часу такі змінні як відстань (довжина) або енергія, що зручно при оцінюванні стану довкілля і прогнозування його розвитку. Слід, однак, зауважити, що для методу інваріантного занурення суттєвою є вимога лінійності рівнянь, які описують стан об'єкта (системи). У разі нелінійних рівнянь (а на практиці саме з ними приходиться мати справу) більш плідним може бути інший підхід. Якщо, наприклад, розглядати певний фізичний процес, відносно якого відомо, що змінна, яка нас цікавить, задовольняє рівнянню типу

$$u_{xx} + u_{yy} + g(u, a) = 0, \quad (8)$$

де a – невідомий параметр або вектор параметрів $a = (a_1, a_2, \dots, a_n)$ і є можливість спостерігати цей процес і замірювати u у різних точках, то на підставі даних цих вимірювань можна визначити параметр a таким чином, щоб рішення наведеного вище рівняння (8) узгоджувалися з даними спостережень. Це класична задача ідентифікації. Її можна вирішувати, використовуючи критерій найменших квадратів. Знаючи значення u на межі області, що нас цікавить, і спостерігаючи процес u у точках x, y , можна скласти рівняння, яке характеризує міру розходження між спостереженнями

і рішенням (8) для даного вектору a :

$$S = \sum_{i=1}^L [u(x_i, y_i) - u_i]^2. \quad (9)$$

При цьому задача ідентифікації зводиться до задачі мінімізації S за усіма можливими виборами вектору a .

Висновки. З метою подолання наслідків підриву греблі Каховського водосховища необхідна розробка заходів щодо зниження ризиків подальших катастроф у цьому регіоні, відновлення (де можливо) хоча б часткової структури водообігу, а також довгострокових заходів, пов'язаних з реалізацією програм відновлення (чи заміщення) греблі на Каховській ГЕС. А це вимагає розробки плану природоохоронних заходів, які ми матимемо реалізувати після деокупації захоплених ворогом теренів та припиненням військових дій, з урахуванням трендів процесів як природних міграцій та метаболізмів, так і заходів щодо прискорення цих процесів. Тут важливо обрати чи створити умови штучного зв'язування компонентів забруднень у конгломерати, які легко піддаються видаленню з використанням фізичних, хімічних або біологічних процесів. При цьому необхідно пам'ятати, що відновлення (навіть часткове) екосистеми – важкий затратомісткий неоднозначний процес, який може стати примітним не одразу і не за усіма показниками, більш того, цей процес може мати свої локальні катастрофи (у математичному сенсі цього поняття), які треба своєчасно виявляти, щоб забезпечити поступовість, послідовність та адекватність кроків з відновлення екосистеми.

Список літератури:

1. Стародубцев В., Гайченко В., Ладика М. Руйнування Каховської ГЕС – техногенна, екологічна і соціальна катастрофа. <https://nubip.edu.ua/node/129547>
2. 7 головних питань і відповідей після підриву Каховської ГЕС. <http://uifuture.org/publications/7-golovnyh-pytan-i-vidpovidej-pislya-pidryvu-kahovskoyi-ges%E1%84%B5%BC/>
3. Довкілля Криму: зміни і втрати за час окупації. Частина II. Забруднення довкілля та виснаження природних ресурсів. – Київ: ГО «КРИМСОС», 2021. 49 с.
4. Теорія систем в екології: підручник / Ю. Г. Масікевич, О. В. Шестопапов, А. А. Негадайло та ін. – Суми : Сумський державний університет, 2015. – 330 с.
5. Лавров В. В. Системний підхід як методологічна основа для оцінки і зменшення загроз біорізноманіттю (лісові екосистеми). Оцінка і напрямки зменшення загроз біорізноманіттю України / за заг. ред. О. В. Дудкіна. – Київ : Хімджест, 2003. – С. 156–273.
6. Dychko, A., Remez, N., Kyselov, V., Kraychuk, S., Ostapchuk, N., & Kniazevych, A. Monitoring and biochemical treatment of wastewater. *Journal of Ecological Engineering*. 2020. 21. P. 4.
7. Dychko A., Yeremeev I. Risks analysis and management of water ecosystems. *Вісник Кременчуцького національного університету імені Михайла Остроградського*. 2018. №. 4. С. 115–121.
8. Yeremeyev, I., Dychko, A., Remez, N., Kraychuk, S., & Ostapchuk, N. Problems of sustainable development of ecosystems. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2021. Vol. 628. № 1. P. 012014.

Yeremeev I.S., Dychko A.O., Minaeva Yu.Yu. APPLICATION OF THE THEORY OF DISASTERS IN RESEARCH OF CONSEQUENCES OF EXPLOSION OF THE KAKHOVKA HYDROELECTRIC POWER PLANT AND MILITARY ACTIONS IN THE CRIMEA

The paper presents an approach to the study of environmental disasters due to the destruction of the Kakhovka HPP based on the elements of catastrophe theory. The aim of the study is analysis of prerequisites of environmental disasters and scientific reasoning of the methodology of study of environmental disasters based on the elements of the theory of disasters. The preliminary analysis of the impact of destruction and flooding caused by the explosion of the Kakhovka HPP and military operations in Crimea on ecosystems is presented. The restoration of the region's environment requires the development of a plan of environmental protection measures, which will be implemented after de-occupation of enemy-occupied territories and the cessation of hostilities, taking into account natural migrations and metabolisms. It is noted that environmental disasters are characterized by complex nonlinear dependences of functions. Such dependencies can be presented in terms of the theory of catastrophes, which allows modeling an ecological catastrophe and predicting its possible consequences and ways of their minimizing. A method of modeling a qualitative description of the dynamics of process by applying the Taylor series and evaluating the critical points of the system behavior function is presented. The value of the disaster type or its selection from a number of alternative types allows to increase the reliability of information estimates under conditions of uncertainty, when some missing data can be reconstructed on the basis of the polynomial that describes the disaster, and "doubtful" data are confirmed as reliable if they are consistent with description of the disaster. When considering the characteristics of disasters and solving the problem of identifying the characteristics of a disaster, it is suggested to use the invariant immersion method to explain "chaotic" phenomena and build adequate models. The developed approach makes it possible to increase the reliability of information assessments under conditions of incomplete data describing the catastrophe.

Key words: ecological catastrophe, ecosystems, catastrophe theory, state identification, invariant immersion method.

Купін А.І.

Криворізький національний університет

Косей М.П.

Криворізький національний університет

ОГЛЯД АРХІТЕКТУРИ МУЛЬТИАГЕНТНИХ СИСТЕМ ТА АЛГОРИТМІВ РОЙОВОГО ІНТЕЛЕКТУ

У роботі наведено огляд основних архітектур мультиагентних систем та розглядаються приклади мультиагентних систем різних видів у механіці, біології, транспорті, моделюванні ройового інтелекту.

Спочатку статті висвітлюється важливість та актуальність застосування і розвитку мультиагентних систем, з аналізом ринкових тенденцій та інвестицій у цю важливу галузь штучного інтелекту.

Для глибшого розуміння контексту та обсягу дослідження надається визначення основних термінів та класифікація агентів і мультиагентних систем.

Також у роботі аналізуються ключові підходи до створення та управління мультиагентними системами, включаючи алгоритми координації, взаємодії між агентами та методи вирішення конфліктів.

Особлива увага приділяється використанню мультиагентних систем для оптимізації процесів у складних динамічних середовищах, таких як ринкові економіки, управління транспортними потоками та екологічне моніторинг. Висвітлюються переваги мультиагентного підходу, включаючи гнучкість, масштабованість та здатність до самоорганізації.

Завершується огляд висновками про поточний стан досліджень у цій області та перспективи розвитку мультиагентних систем.

Далі увага читача акцентується на концепції ройового інтелекту – одній з найбільш передових та стрімко прогресуючих сфер застосування мультиагентних систем.

Особливе місце у дослідженні займають алгоритми оптимізації ройового інтелекту, які відіграють ключову роль у розв'язанні складних задач оптимізації за допомогою імітації поведінки колективів соціальних тварин. Такі алгоритми, як мурашиний алгоритм, алгоритм рою часток, та багато інших, демонструють високу ефективність у вирішенні оптимізаційних задач в різних областях, від логістики до машинного навчання.

Подальший напрямок досліджень тісно пов'язаний з розвитком гібридних систем, які комбінують можливості ройового інтелекту з іншими методами штучного інтелекту, включаючи нейронні мережі та глибинне навчання. Такий підхід дозволить створювати ще більш потужні та адаптивні системи, здатні ефективно вирішувати складні завдання в динамічних та непередбачуваних середовищах, відкриваючи нові горизонти застосування мультиагентних систем і ройового інтелекту.

Ключові слова: штучний інтелект, інтелектуальний агент, мультиагентні системи, ройовий інтелект, алгоритми оптимізації ройового інтелекту.

Постановка проблеми. Наразі мультиагентні системи знаходять все більше застосування в найрізноманітніших галузях науки та техніки, стаючи невід'ємною частиною сучасного технологічного розвитку. Особливо в умовах військового часу, коли зростає потреба в автономних системах з високим рівнем інтелектуального управління, тому актуальність та важливість розробки мультиагентних систем значно збільшується.

У цьому контексті, ройовий інтелект представляє собою винятковий інтерес, оскільки він пропонує механізми для досягнення високої ефектив-

ності в координації дій між агентами, за аналогією з поведінкою соціальних тварин.

Його використання відкриває нові перспективи для створення високоєфективних, надійних та адаптивних систем, що здатні самостійно вирішувати складні завдання в динамічних умовах невизначеності.

Застосування ройового інтелекту в автономних дронах (БПЛА) має місце у багатьох галузях, включаючи військові застосування, сільське господарство, пошуково-рятувальні операції, будівництво, та моніторинг довкілля.

Згідно прогнозів аналітиків [1], тільки в 2022 році обсяг ринку військових дронів оцінювався у 12,55 мільярда доларів США, в 2023 році – 14,14 мільярда доларів США, а до 2030 року зросте до 35,60 мільярда доларів США, демонструючи середньорічний темп зростання (CAGR – Compound Annual Growth Rate) 14,10%, при цьому серед лідерів ринку є такі дуже відомі компанії: Lockheed Martin, Northrop Grumman, General Atomics, Boeing.

Таке стрімке зростання обсягу ринку військових дронів вказує на значний інтерес та інвестиції в цю сферу, а також на широке впровадження дронів у військовій сфері по всьому світу, причиною якого стали сучасні конфлікти та війни (широкомасштабне вторгнення Росії в Україну з 24 лютого 2022 року, терористична атака Хамасу на Ізраїль з 7 жовтня 2023 року) і бурхливий прогрес у сфері штучного інтелекту, який відбувається в сучасний час.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Для покращення розуміння наступного матеріалу пропонується ознайомитися з термінами, які будуть наведені далі.

Складна система визначається як система, що складається з численних компонентів, між якими існує значна кількість взаємозв'язків, через що поведінка кожного окремого компонента є залежною від поведінки інших [2].

Агент – автономна сутність, яка може бути реальною або віртуальною, що функціонує в зовнішньому середовищі. Агент здатний сприймати середовище та взаємодіяти з ним. Також агент може комунікувати з іншими агентами, демонструвати самостійну поведінку, яка може бути інтерпретована як результат його знань, взаємодії з іншими агентами та досягнення власних цілей.

Елементи, за допомогою яких агенти сприймають зовнішнє середовище, зазвичай називають сенсорами, а засоби, якими агенти впливають на середовище, – ефекторами або актуаторами. Під це визначення підпадає чимало сутностей – від комп'ютерних програм і роботів до людей.

Мультиагентна система – це складна система, яка переважно складається з агентів.

У книзі «Штучний інтелект: Сучасний підхід» авторів Стюарта Рассела та Пітера Норвіга [3], яка вважається однією з найавторитетніших і найпопулярніших праць у галузі штучного інтелекту, представлена класифікація агентів за рівнем їхньої «інтелектуальності». За визначенням авторів, ця класифікація охоплює усі агентні системи:

1. Прості рефлекторні агенти, що виконують дії на основі свого поточного сприйняття. Вони

здатні діяти ефективно лише тоді, коли середовище повністю спостережуване.

2. Рефлекторні агенти з внутрішньою моделлю. Цей вид агентів включає в себе модель невидимої на даний час частини середовища, зокрема, враховує дані про попередні сприйняття та дії агента. Такі агенти здатні функціонувати в середовищі, яке спостерігається лише частково.

3. Агенти, орієнтовані на досягнення цілей. Цей тип включає в себе агентів з моделлю, які володіють знаннями про конкретні цілі, тобто набором станів, які вони прагнуть досягти.

4. Агенти, засновані на корисності. Такі агенти під час своєї діяльності прагнуть максимізувати функцію корисності, яка дозволяє їм ранжувати потенційні стани, в яких агент може опинитися, згідно з їх корисністю.

5. Агенти, що навчаються. Цей тип агентів здатен функціонувати у спочатку невідомих середовищах, поступово збираючи дані про найбільш ефективні стратегії поведінки.

Дуже популярним підходом у проектуванні агентів [4] є модель переконань, бажань і намірів (BDI – Belief, Desire, Intention) є. У цій моделі «переконання» представляють собою інформацію про світ, яка відома агенту, а також правила для виведення нової інформації з доступних даних. «Бажання» пов'язані з завданнями, які агент планує виконати, а «наміри» відповідають за дії, які агент має здійснити для реалізації своїх завдань. Модель також включає «події» – фактори, що можуть змінювати «переконання», «бажання» та «наміри». Традиційні моделі BDI використовують темпоральну Computational Tree Logic CTL.

При розгляді агентів варто згадати тісно пов'язане поняття актора [5]. *Актор* – це сутність, яка у відповідь на отримане повідомлення може:

- надіслати обмежену кількість повідомлень іншим акторам;
- створити обмежену кількість нових акторів;
- визначити поведінку, яка буде використовуватися при обробці наступного повідомлення, отриманого актором.

Основні відмінності між актором і агентом полягають у тому, що агент активний постійно, у той час як актор активується при отриманні повідомлення. Також агенти спілкуються, змінюючи навколишнє середовище, тому для комунікації не потрібно заздалегідь знати про існування агента, тоді як актори здійснюють обмін повідомленнями за допомогою заздалегідь відомих адрес. Модель агентів може бути реалізована за допомогою акторів.

В одному з перших оглядів (1998 р.) [6] було запропоновано наступний поділ методологій побудови агентних систем на:

- об'єктно-орієнтовані методології, в рамках яких агенти (включаючи BDI-агентів) вважаються активними об'єктами;
- методології інженерії знань (Knowledge engineering), що використовують онтології та методи виведення;
- формальні підходи, які базуються на застосуванні формальних мов та темпоральної модальної логіки;
- змішані варіанти.

У огляді 2000 року [7] мультиагентні системи розглядалися разом із розподіленим розв'язанням задач (Distributed Problem Solving) як інтегральні складові розподіленого штучного інтелекту (Distributed Artificial Intelligence).

У цьому огляді було представлено різні типові сценарії для многагентних систем і наведено перелік можливостей для застосування методів машинного навчання.

Була запропонована класифікація систем агентів за двома вимірами:

- рівень різноманітності агентів (гомогенні та гетерогенні системи);
- обсяг та тип взаємодії між агентами.

Згідно з першим виміром, системи агентів класифікують на однорідні та різнорідні, а за другим виміром – на агентів, що взаємодіють між собою або не взаємодіють, кооперативних та конкуруючих агентів тощо.

В деяких дослідженнях мультиагентні системи аналізуються через призму класичної теорії керування, що отримало назву «мережеве керування». Мережеве керування характеризується інтеграцією класичних інструментів теорії керування з методами теорії графів. Наприклад, у роботі [8] зазначається, що такі задачі керування, як управління групою роботів, розподілений інтелект, інтелект зграї, розподілене прийняття рішень, розподілене пізнання, керування переважаннями в мережах, колективний рух у біології, синхронізація осциляторів у фізиці, паралелізація в теорії оптимізації, розподілена оцінка, спільна оцінка, рівновага в економіці, моделювання соціальних взаємодій та теорія ігор можуть бути розглянуті через теорію взаємопов'язаних динамічних систем.

Ці наукові галузі науки мають декілька перетинаючих дослідницьких спільнот, що призводить до розмаїття у визначеннях і методологіях, варіюючи від детального математичного аналізу до практичних досліджень. Через це також існує від-

сутність уніфікованої термінології: так, динамічні системи можуть отримувати такі назви як роботи, агенти, вузли, процесори чи об'єкти. Групи описуються, як мережі, загони, рої, команди або кластери, а методики можуть бути представлені як контролери, протоколи або динаміки. У згаданому джерелі слово «агент» вживається для опису окремої динамічної системи, тоді як терміни «мережа» або «колектив» використовуються для опису груп. Викладаються проблеми знаходження консенсусу, організації структури, оптимізації розподілу ресурсів через поняття динамічних систем.

У дисертації [9] аналізуються проблеми досягнення консенсусу та синхронізації агентів, які зустрічаються в багатьох сферах науки. Кожному агенту відповідає певна динамічна система, а консенсус та синхронізація досліджуються у мережах окремих динамічних систем, з'єднаних за допомогою певної топології, що представлена графом зв'язків. Системи моделюються за допомогою звичайних диференціальних рівнянь. У зазначеній дисертації представлено куб складності зв'язаних систем (рис. 1). Припускаючи, що зв'язок між окремими системами описується певною топологією, можна виділити три незалежні виміри складності: складність окремих систем, складність топології зв'язності та складність самих зв'язків.

А у монографії українських авторів – В.Л. Плескач, Ю.В. Рогушина [10] викладено, що для дослідження поведінки мультиагентних систем застосовуються методи з різноманітних наукових дисциплін:

- розподілений штучний інтелект, включаючи теорію розподілених систем та теорії прийняття рішень, що фокусується на основних аспектах колективної діяльності агентів;
- теорія ігор застосовується для аналізу сценаріїв, подібних до кооперативних ігор, та стратегій, що використовуються у процесі переговорів;
- теорія колективної поведінки автоматів, яка досліджує колективну поведінку великих груп автоматів з примітивними функціями, спроможних навчатися за допомогою системи штрафів і заохочень;
- біологічні, економічні та соціальні моделі.

Проаналізувавши найбільш популярні та поширені останні дослідження та публікації у галузі мультиагентних систем можна зробити наступні висновки:

1. Дослідження мультиагентних систем використовує підходи та методи з різноманітних наукових областей, включаючи розподілений штучний

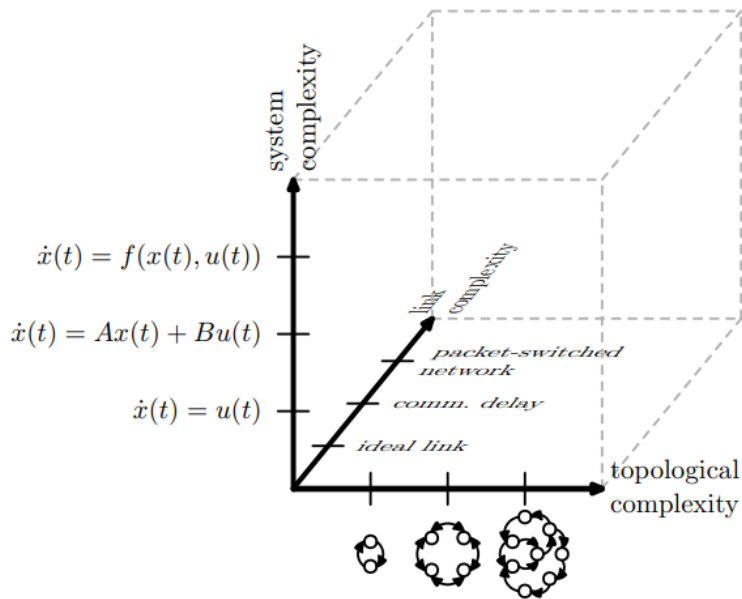


Рис. 1. Куб складності для зв'язаних динамічних систем

інтелект, теорію ігор, теорію колективної поведінки автоматів, а також біологічні, економічні та соціальні моделі. Це свідчить про складність і багатогранність галузі, а також про потребу в комплексному підході до вирішення поставлених задач.

2. Мультиагентні системи знаходять застосування у широкому спектрі доменів, від робототехніки та розподілених обчислень до економіки та соціальних наук. Це вказує на гнучкість та адаптивність мультиагентних систем до різних умов і завдань.

3. Дослідження надають як теоретичні рамки для розуміння фундаментальних принципів роботи мультиагентних систем, так і практичні методики для реалізації ефективних систем у реальних умовах. Це підкреслює потенціал мультиагентних систем як у наукових дослідженнях, так і у промисловому застосуванні.

4. Сфера мультиагентних систем продовжує розвиватися, пропонуючи нові теоретичні підходи та інноваційні рішення для практичних задач. Активне дослідження та публікація в цій області свідчать про її актуальність і перспективність для подальшого наукового прогресу.

Постановка завдання. У даній статті буде акцентована увага на ройовому інтелекті, як на ключовому напрямку в галузі мультиагентних систем, особливо зосереджуючись на взаємодії між агентами, як на фундаментальному елементі в галузі мультиагентних систем.

Основна увага буде зосереджена на алгоритмах ройового інтелекту, їх застосуванні для

вирішення складних оптимізаційних та координаційних задач, а також на потенціалі ройового інтелекту для розробки нових технологій у різних областях, включаючи робототехніку, розподілені обчислення, управління трафіком та інші.

Виклад основного матеріалу. Ройовий інтелект є однією з галузей штучного інтелекту, яка динамічно розвивається. Як попередників ройового інтелекту можна згадати три алгоритми: алгоритм стохастичного дифузійного пошуку (SDS – Stochastic Diffusion Search), мурашиний алгоритм (ACO – Ant Colony Optimization) та метод рою часток (PSO – Particle Swarm Optimization).

Алгоритм SDS було опубліковано у 1989 році Джоном Марком Бішопом [11]. SDS є першою метаевристикою ройового інтелекту, де було представлено техніку глобального пошуку на основі ймовірності та агентів.

ACO було опубліковано у 1992 році Марко Доріго в його докторській дисертації. Основним джерелом натхнення для ACO були дії реальної колонії мурах. Початковий алгоритм ACO є ймовірнісною технікою оптимізації, корисною в дискретній оптимізації для знаходження найкращих шляхів у графах.

PSO було опубліковано у 1995 році Джеймсом Кеннеді та Расселом Ебергардом. Основне джерело натхнення для алгоритму PSO була соціальна поведінка таких організмів, як птахи (згряя птахів) або риби (косяк риб). Оригінальний PSO це метод глобальної оптимізації для неперервної області.

На основі загальної концепції ройового інтелекту на сьогоднішній день розроблено багато алгоритмів натхнених природою.

Сімейство алгоритмів ройового інтелекту продовжує розширюватися. Нижче надано перелік 45 алгоритмів[13] впорядкованих за датою створення (Таблиця 1).

Алгоритми ройового інтелекту є винятковим прикладом того, як природні процеси та поведінки можуть бути адаптовані для розв'язання складних задач в областях оптимізації, пошуку та інших обчислювальних задач.

Ключовими характеристиками алгоритмів ройового інтелекту є їх здатність до самоорганізації, гнучкості, масштабованості та робастності. Вони ефективно використовують колективну поведінку множини агентів для досягнення спільної мети без необхідності централізованого керування. Це робить їх особливо привабливими для задач, де традиційні підходи можуть бути неефективними або занадто складними для реалізації.

У майбутньому розвиток та вдосконалення алгоритмів ройового інтелекту, ймовірно, зосередяться на підвищенні їх ефективності, зниженні обчислювальних витрат, та розширенні сфер застосування. Це може включати інтеграцію з іншими методами штучного інтелекту,

такими як глибинне навчання та різні види нейромереж, для створення гібридних систем, які можуть ще більше покращити здатність до вирішення складних та динамічних задач в реальному часі.

Висновки. У даній роботі було проведено огляд ключових архітектур мультиагентних систем і алгоритмів ройового інтелекту, який підкреслив значні перспективи розвитку мультиагентних систем і ройового інтелекту, вказуючи на активність досліджень у цій області та постійне розширення сфери їхнього застосування. Розгляд різноманітних досліджень і публікацій дозволив зробити висновок про важливість інтеграції підходів з різних наукових дисциплін для розв'язання різноманітних і складних задач за допомогою ройового інтелекту.

У подальших дослідженнях планується зробити більш детальний аналіз різних алгоритмів ройового інтелекту та їх порівняння між собою в різних сферах застосування, синтез з іншими методами штучного інтелекту.

Подальші дослідження зосередяться на детальному аналізі та порівнянні алгоритмів ройового інтелекту між собою в різних областях застосування, а також на їх інтеграції з іншими методами штучного інтелекту.

Таблиця 1

Перелік алгоритмів оптимізації ройового інтелекту

Назва алгоритма	Рік	Біологічне натхнення
1	2	3
Стохастичний дифузійний пошук (Stochastic Diffusion Search)	1989	Механізм тандемного зв'язку, використовуваний одним видом мурах
Оптимізація колонії мурах (Ant Colony Optimization)	1992	Реальні колонії мурах, які використовують феромон як засіб хімічного посланника
Оптимізація роєм частинок (Particle Swarm Optimization)	1995	Соціальна поведінка зграї птахів або школи риб
Система бджіл (Bee System)	2001	Поведінка збирання нектару колоніями бджіл
Бактеріальний пошук (Bacterial Foraging)	2002	Соціальна поведінка здобування їжі Escherichia coli
Алгоритм рою риб (Fish-swarm Algorithm)	2002	Поведінка риб, така як полювання та формування зграї
Бджолиний вулик (Beehive)	2004	Комунікативні та оціночні методи та процедури медоносних бджіл
Хемотаксис колонії бактерій (Bacterial Colony Chemotaxis)	2005	Реакція бактерій на хемоатрактанти
Оптимізація колонією бджіл (Bee Colony Optimization)	2005	Колонії бджіл у природі
Оптимізація роєм бджіл (Bee Swarm Optimization)	2005	Поведінка реальних бджіл у природі
Віртуальні бджоли (Virtual Bees)	2005	Рій бджіл та взаємодії між ними, коли вони знаходять нектар
Рій котів (Cat Swarm)	2006	Поведінка котів та їхні навички, такі як слідкування та пошук
Штучна колонія бджіл (Artificial Bee Colony)	2007	Природна поведінка збирання їжі реальними медоносними бджолами

1	2	3
Швидке бактеріальне зграювання (Fast Bacterial Swarming)	2008	Механізм здобування їжі Escherichia coli та модель зграювання птахів
Шмели (Bumblebees)	2009	Колективна поведінка соціальних комах
Пошук кукушки (Cuckoo Search)	2009	Паразитична поведінка деяких видів кукушок
Алгоритм світляків (FireFly Algorithm)	2009	Поведінка світляків та їх світіння
Оптимізація роєм світлячків (Glowworm Swarm Optimization)	2009	Світіння, індуковане люциферином, світляка, яке використовується для приваблення партнерів/здобичі
Штучний алгоритм рибної школи (Artificial Fish School Algorithm)	2010	Поведінка риб, така як полювання, формування зграї, слідування
Алгоритм кажана (Bat Algorithm)	2010	Характеристики ехолокації мікрокажанів
Оптимізація роєм тарганів (Cockroach Swarm Optimization)	2010	Соціальна поведінка тарганів
Пошук під час полювання (Hunting Search)	2010	Групове полювання тварин, таких як леви, вовки та дельфіни
Оптимізація колонією бактерій (Bacterial Colony Optimization)	2012	П'ять основних поведінок бактерій Escherichia coli протягом їхнього життєвого циклу
Сліпі голі кроти (Blind-Naked Mole-Rats)	2012	Соціальна поведінка колонії сліпих голих кротів
Стадо криля (Krill Herd)	2012	Поведінка стада криля
Алгоритм лева (Lion's Algorithm)	2012	Соціальна поведінка левів, яка допомагає зберегти тварину сильною у світі
Пошук вовків (Wolf Search)	2012	Вовки шукають їжу та виживають, уникаючи ворогів
Оптимізація мухою (Fruit Fly Optimization)	2013	Поведінка мух-плодоїдів
Оптимізація соціальними павуками (Social Spider Optimization)	2013	Кооперативна поведінка соціальних павуків, які взаємодіють один з одним
Оптимізація роєм курей (Chicken Swarm Optimization)	2014	Поведінка курей під час пошуку їжі
Оптимізація розсіяними мухами (Dispersive Flies Optimisation)	2014	Поведінка рою мух над джерелами їжі
Оптимізатор сірих вовків (Grey Wolf Optimizer)	2014	Імітує соціальну домінуючу структуру зграї сірих вовків
Ведення слонів (Elephant Herding)	2015	Поведінка стада слонів
Оптимізація монарх-метеликів (Monarch Butterfly Optimization)	2015	Міграція монарх-метеликів
Алгоритм пошуку ворон (Crow Search Algorithm)	2016	Інтелектуальна поведінка ворон
Алгоритм рою дельфінів (Dolphin Swarm Algorithm)	2016	Ехолокація дельфінів, обмін інформацією, співпраця
Динамічний віртуальний алгоритм кажанів (Dynamic Virtual Bats Algorithm)	2016	Здатність кажанів маніпулювати частотою/довжиною хвилі випромінюваних звукових хвиль
Алгоритм оптимізації китів (Whale Optimization Algorithm)	2016	Соціальна поведінка горбатих китів – стратегія полювання «бульбашковою сіткою»
Алгоритм рою дельфінів (Swarm Dolphin Algorithm)	2016	Соціальні поведінки дельфінів
Штучний алгоритм вовчої зграї (Artificial Wolf Pack Algorithm)	2016	Соціальні поведінки вовчої зграї при розвідці, виклику та облозі
Оптимізація сараною (Grasshopper Optimisation)	2017	Поведінка зграї сарани в природі
Оптимізатор плямистих гієн (Spotted Hyena Optimizer)	2017	Соціальні відносини між плямистими гієнами та їхнє співробітництво
Алгоритм рою сальп (Salp Swarm Algorithm)	2017	Поведінка рою сальп під час навігації та здобування їжі в океанах
Оптимізатор імператорських пінгвінів (Emperor Penguin Optimizer)	2018	Імітує поведінку згуртування імператорських пінгвінів
Алгоритм оптимізації чайок (Seagull Optimization Algorithm)	2019	Міграція та нападаючі поведінки чайки в природі

Список літератури:

1. Military Drone Market to Hit USD 35.60 Billion by 2030 | Featuring a Detailed 200-Pages Research Report. URL: <https://www.fortunebusinessinsights.com/military-drone-market-102181> (дата звернення 02.02.2024)
2. Herbert A. Simon – The Architecture of Complexity. URL: <https://www2.econ.iastate.edu/tesfatsi/ArchitectureOfComplexity.HSimon1962.pdf> (дата звернення: 02.02.2024).
3. Russell S. J., Norvig P. Artificial Intelligence: A Modern Approach (4th Edition). Pearson, 2020. 1132 p.
4. Anand S. Rao and Michael P. Georgeff – BDI Agents: From Theory to Practice. URL: <https://cdn.aaai.org/ICMAS/1995/ICMAS95-042.pdf> (дата звернення: 02.02.2024).
5. Hewitt, Carl – Viewing Control Structures as Patterns of Passing Messages. URL: <https://dspace.mit.edu/handle/1721.1/6272> (дата звернення: 02.02.2024).
6. Carlos A. Iglesias, Mercedes Garijo and Jose C. Gonzalez – A Survey of Agent-Oriented Methodologies. URL: https://www.researchgate.net/publication/221456186_A_Survey_of_Agent-Oriented_Methodologies (дата звернення: 02.02.2024).
7. Peter Stone, Manuela Veloso – Multiagent Systems: A Survey from a Machine Learning. URL: <https://www.cs.cmu.edu/~mmv/papers/MASsurvey.pdf> (дата звернення: 02.02.2024).
8. Gianluca Antonelli – Interconnected dynamic systems: An overview on distributed control. IEEE Control Systems. 2013. Vol. 33, no. 1. P. 76–88. URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/6415463> (дата звернення: 02.02.2024).
9. Wieland P. – From static to dynamic couplings in consensus and synchronization among identical and non-identical systems / vorgelegt von Peter Wieland. 2010. URL: <http://d-nb.info/1008368504/34> (дата звернення: 07.02.2024).
10. В.Л. Плєскач, Ю.В. Рогущина – Агентні технології. URL: <https://core.ac.uk/download/pdf/38468943.pdf> (дата звернення: 02.02.2024)
11. John Mark Bishop – Stochastic searching networks. URL: https://www.researchgate.net/publication/3576975_Stochastic_searching_networks (дата звернення: 02.02.2024)
12. Aboul Ella Hassanien, Eid Emary. SWARM INTELLIGENCE: Principles, Advances, and Applications. CRC Press, 2016. 220 p.
13. Adam Slowik. Swarm Intelligence Algorithms: A Tutorial. CRC Press, 2020. 348 p.

Kupin A.I., Kosei M.P. OVERVIEW OF MULTI-AGENT SYSTEM ARCHITECTURES AND SWARM INTELLIGENCE ALGORITHMS

This work provides an overview of the main architectures of multi-agent systems and examines examples of multi-agent systems of various types in mechanics, biology, transportation, and modeling of swarm intelligence. Initially, the article highlights the importance and relevance of the application and development of multi-agent systems, analyzing market trends and investments in this crucial area of artificial intelligence. Definitions of key terms and classifications of agents and multi-agent systems are provided for a deeper understanding of the research context and scope.

The work also analyzes key approaches to creating and managing multi-agent systems, including coordination algorithms, agent interaction, and conflict resolution methods. Special attention is given to the use of multi-agent systems for optimizing processes in complex dynamic environments, such as market economies, traffic management, and environmental monitoring. The advantages of the multi-agent approach, including flexibility, scalability, and the ability to self-organize, are highlighted. The review concludes with findings on the current state of research in this area and the prospects for the development of multi-agent systems. Further, the reader's attention is focused on the concept of swarm intelligence – one of the most advanced and rapidly progressing fields of application of multi-agent systems.

A special place in the study is occupied by swarm intelligence optimization algorithms, which play a key role in solving complex optimization tasks by imitating the behavior of social animal collectives. Algorithms such as the ant colony algorithm, particle swarm optimization, and many others demonstrate high efficiency in solving optimization tasks in various fields, from logistics to machine learning.

The future direction of research is closely related to the development of hybrid systems that combine the capabilities of swarm intelligence with other artificial intelligence methods, including neural networks and deep learning. This approach will allow for the creation of even more powerful and adaptive systems capable of efficiently solving complex tasks in dynamic and unpredictable environments, opening new horizons for the application of multi-agent systems and swarm intelligence.

Key words: artificial intelligence, intelligent agent, multi-agent systems, swarm intelligence, swarm intelligence optimization algorithms.

Лісовець С.М.

Таврійський національний університет імені В.І. Вернадського

Ківа І.Л.

Таврійський національний університет імені В.І. Вернадського

Гуйда О.Г.

Таврійський національний університет імені В.І. Вернадського

НЕРУЙНІВНИЙ АКУСТИЧНИЙ КОНТРОЛЬ ПОВЕРХНЕВОЇ ГУСТИНИ І ІНШИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ БАГАТОВІСНИХ ТКАНИН: ПЕРЕВАГИ І НЕДОЛІКИ

Стаття присвячена засобам дослідження властивостей деяких текстильних матеріалів, які вже давно і у великих кількостях використовуються людьми в побуті і виробничій діяльності, а їх асортимент, в залежності від призначення, є дуже різноманітним. В проведеному дослідженні розглянуто тканини, які відносяться до текстильних матеріалів, що складаються з кількох шарів ниток, розміщених одні відносно одних в різних напрямках (по різних осях) – це так звані багатовісні тканини. В ньому встановлено, що властивості текстильних матеріалів звичайно контролюються за допомогою різних руйнівних методів, коли спочатку отримується зразок (фрагмент) текстильного матеріалу, а після цього вимірюються і аналізуються його властивості. Також встановлено, що основним недоліком руйнівних методів контролю є відсутність оперативності, коли необхідно контролювати текстильний матеріал (багатовісну тканину), наприклад, в процесі виробництва, швидко оцінюючи її властивості і впливаючи, за необхідності, на технологічний процес її виготовлення. Відомо, що акустичні методи контролю, які використовують безконтактні акустичні перетворювачі і є неруйнівними, можуть бути використані як доповнення, а іноді як заміна для існуючих руйнівних методів. Встановлено, що в таких випадках доцільно використовуються тіньові методи, коли акустичні перетворювачі розташовуються по різні сторони багатовісної тканини. Також встановлено, що у випадку контролю однієї якоїсь властивості багатовісної тканини, наприклад, поверхневої густини, товщини одного з шарів або непроклеювання, вона звичайно однозначно впливає на загасання або фазовий зсув акустичних коливань, або одночасно на них обох. В дослідженні також підтверджено, що неруйнівний акустичний контроль добре піддається автоматизації і інтегруванню в різноманітні комп'ютерно-інтегровані системи керування і SCADA-системи.

Ключові слова: багатовісна тканина, механізм фіксації шарів, поверхнева густина, хімічна система переплетення, шар ниток.

Постановка проблеми. Багатовісні тканини (мультиаксіальні тканини, multi-axial fabrics) – це спеціальні тканини, які складаються з кількох шарів ниток, що орієнтовані в різних напрямках у відповідності із заданою системою переплетення. Кількість шарів ниток, їх орієнтація, способи з'єднання шарів ниток між собою і деякі інші властивості системи переплетення звичайно визначаються, виходячи з області використання таких тканин і допустимого навантаження (механічного, електричного, хімічного тощо), яке буде здійснюватися на такі тканини. Нитки багатовісних тканин можуть виготовлятися з достатньо різних за своїми фізико-хімічними властивостями матеріалів, таких як джутути, ровінги, вовняні

і армуючі волокна, плівки і так далі. Таким чином, склад багатовісних тканин може бути достатньо різноманітним, причому в одній і тій же самій тканині кожен окремих шар може бути виготовленим з різних матеріалів, а кожен сусідній шар можуть бути з'єднані різними способами. Зважаючи на це, поверхнева густина і інші властивості багатовісних тканин можуть змінюватися в широкому діапазоні значень.

В залежності від матеріалів, які використовуються для ниток, багатовісні тканини класифікуються як арамідні, вуглецеві, скляні, керамічні, поліамідні, поліетиленові, поліефірні, поліетилентерефталатні, поліпропіленові, поліоксидозольні, поліолефінові і деякі інші. Механізм

фіксації шарів багатовісної тканини, включаючи захисні і / або внутрішні шари, полягає у використанні прошивки нитками і / або у використанні хімічних систем переплетення (хімічна система переплетення полягає в фіксації шарів за допомогою хімічних властивостей в'язучої речовини).

В свою чергу, багатовісні тканини як окремих виріб можуть з'єднуватися одна з одною, формуючи більш товсту і, відповідно, більш складну конструкцію заданого призначення. Вимоги до багатовісних тканин визначаються кількома стандартами, одними з яких є європейські регіональні стандарти [1, 2, 3].

Область використання багатовісних тканин є дуже широкою: це автомобілебудування (елементи кузовів транспортних засобів, чохли і тенти), авіабудування (елементи корпусів і обтічників літальних апаратів), будівництво (армовані несучі конструкції, профілі для вікон і дверей, ємності і резервуари), товари для спорту і туризму (елементи корпусів плавальних засобів, палатки), медичні засоби (протезування, відновлення функцій руху) і так далі.

Порівнюючи між собою багатовісні тканини (з одного боку) та, наприклад, склотканини і скломати (з іншого боку), можна дійти висновку, що багатовісні тканини є більш універсальними (зокрема, у більшості склотканин всі нитки знаходяться в упорядкованому стані, але тільки в одному шарі, а у більшості скломатів всі нитки знаходяться в кількох шарах, які з'єднані між собою за допомогою в'язучої речовини, але в хаотичному стані). Багатовісні тканини мають багато переваг: по-перше, нитки в багатовісних тканинах можна розташовувати в різних напрямках (під різними кутами); по-друге, за рахунок відсутності переплетення ниток шари в багатовісних тканинах розташовуються більш щільно один до одного, і це дозволяє економити до (15...30)% в'язучої речовини; по-третє, при

тій же самій міцності поверхнева густина багатовісних тканин зменшується на (40...50)%; по-четверте, можна обходитися мінімальною кількістю шарів ниток; по-п'яте, поверхня багатовісних тканин є гладкою.

Поверхнева густина багатовісних тканин, які випускаються, звичайно лежить в діапазоні від 300 до 2400 г/м². Орієнтація ниток звичайно становить -90, -45, 0, +45 і +90°, хоча допускається і їх довільна орієнтація в діапазонах від -90 до -20° і від +20 до +90° (кути звичайно визначаються між напрямом руху тканин при їх виробництві і напрямом розташування ниток). Наприклад, двовісні тканини можуть бути із орієнтацією ниток 0 і +90° (див. рис. 1, а), тривісні – із орієнтацією ниток -45, 0 і +45° (див. рис. 1, б), а чотиривісні – із орієнтацією ниток -45, 0, +45 і +90° (див. рис. 1, в).

Аналіз останніх досліджень і публікацій.

До однієї з найважливіших властивостей багатовісних тканин відноситься їх маса на одиницю площі (тобто поверхнева густина). Відповідно до нормативної документації, її необхідно наносити на кожен упаковку з такими тканинами. Маса на одиницю площі багатовісних тканин, зокрема, повинна визначатися згідно з методом, наведеним в [4], шляхом відбору проб згідно з планами, наведеними в [5]. Такий метод є або руйнівним (так як передбачає викроювання проб за допомогою шаблону і інструмента для обрізання), або незручним і неточним (так як передбачає використання в якості проби всієї багатовісної тканини, змотаної в рулон). Що ж стосується, наприклад, визначення масових часток вологи і речовин, які вилучаються при прожарюванні, то воно також передбачає відбір проб згідно з [5]. Наведений в [4] метод практично завжди забезпечує потрібну точність вимірювання. Але час, витрачений на одне вимірювання, може займати кілька одиниць і навіть десятків хвилин. Якщо висока точність

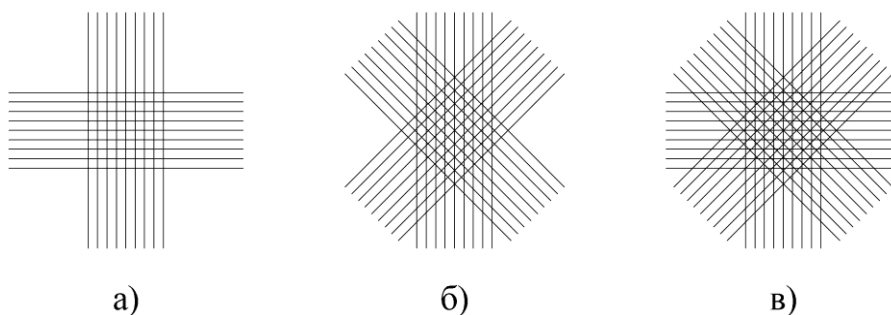


Рис. 1. Орієнтація ниток багатовісних тканин: а) двоспрямована; б) триспрямована; в) чотириспрямована

вимірювання маси на одиницю площі багатовісних тканин не є дуже необхідною, а час вимірювання не повинен перевищувати кількох секунд, у нагоді можуть стати тіньові акустичні методи неруйнівного акустичного контролю згідно з [6].

Постановка завдання. Полягає в розробці структури зразкових і вимірювальних каналів, які використовують амплітудний і фазовий тіньові акустичні методи контролю. Перший з них ґрунтується на порівнянні амплітуд акустичних коливань, які проходять повітряне середовище без багатовісної тканини і з такою тканиною. Другий ґрунтується на порівнянні фаз акустичних коливань, які, так само, як і в першому випадку, проходять повітряне середовище без багатовісної тканини і з такою тканиною. Шлях проходження акустичних коливань без багатовісної тканини може вважатися зразковим, а з багатовісною тканиною – вимірювальним.

Виклад основного матеріалу. В дослідженні було послідовно розглянуто амплітудний (див. рис. 2) і фазовий (див. рис. 3) тіньові акустичні методи контролю з точки зору їх використання при дослідженні поверхневої густини і інших власти-

востей (товщини, втрати маси при прожарюванні, умісту апрету і вологи тощо) багатовісних тканин, в тому числі шляхом використання автоматизованої скануючої системи [7]. Як у випадку використання амплітудного, так і у випадку використання фазового тіньових акустичних методів, створювані генератором гармонійних коливань 1 частотою (40...120) кГц підсилюються підсилювачем потужності 2, і одночасно з цим з них генератором прямокутних імпульсів 3 формуються пакети з 15...25 коливань. Типова частота слідування таких пакетів становить (0,5...2) Гц.

Зразковий канал розповсюдження акустичних коливань утворюється електроакустичним випромінювачем 4 і акустоелектричним приймачем 7, Аналогічним чином, вимірювальний канал утворюється електроакустичним випромінювачем 5, багатовісною тканиною 6 і акустоелектричним приймачем 8. Одночасне використання зразкового і вимірювального каналів дозволяє врахувати температурну зміну швидкості розповсюдження акустичних коливань через повітряне середовище. Попередні підсилювачі 9 і 10 підсилюють прийняті пакети електричних коливань до рівня,

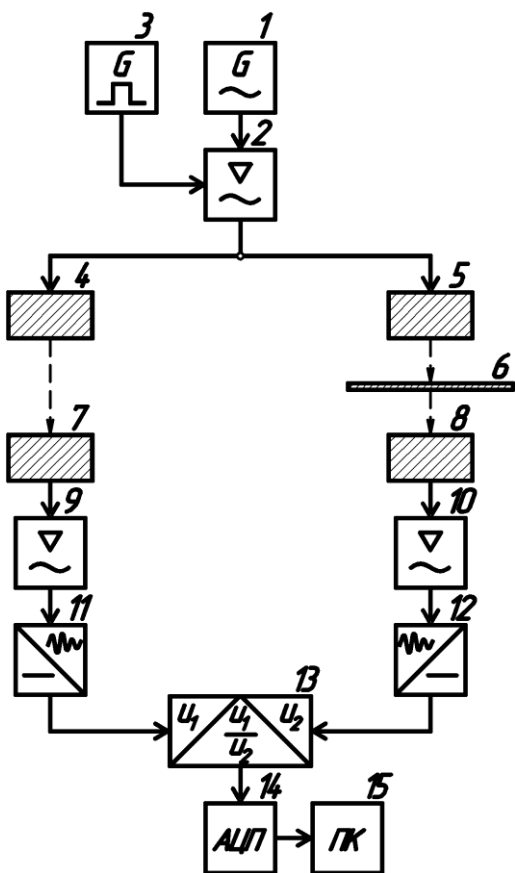


Рис. 2. Спрощена схема реалізації амплітудного тіньового акустичного методу контролю

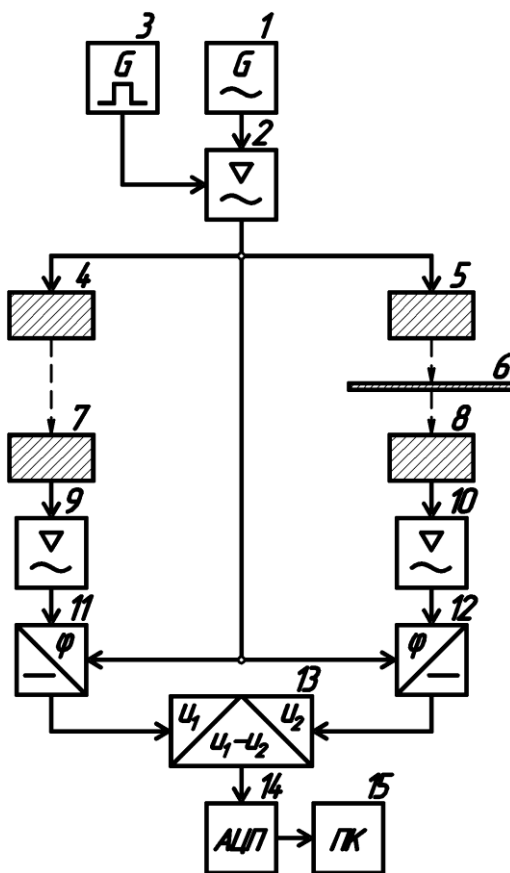


Рис. 3. Спрощена схема реалізація фазового тіньового акустичного методу контролю

коли їх можна використовувати для амплітудного або фазового детектування.

Амплітудний тіньовий акустичний метод контролю (див. рис. 2) передбачає використання амплітудних детекторів 11 і 12, які формують напруги u_1 і u_2 огинаючих відповідно зразкового і вимірювального прийнятих пакетів акустичних коливань, які перетворені в пакети електричних коливань. Наявність у вимірювальному каналі багатовісної тканини 6 приводить до суттєвого зменшення значення u_2 , внаслідок чого відношення u_1/u_2 на виході блока ділення 13 може змінюватися в широкому діапазоні значень. Таке відношення оцифровується аналого-цифровим перетворювачем 14 і надходить до промислового комп'ютера 15, де обробляється за допомогою відповідного програмного забезпечення.

Фазовий тіньовий акустичний метод контролю (див. рис. 3), на відміну від амплітудного, передбачає використання фазових детекторів 11 і 12 замість амплітудних, які формують напруги u_1 і u_2 , що пропорційні фазовим зсувам прийнятих пакетів електричних коливань відносно пакетів електричних коливань на виході підсилювача потужності 2. Такі зсуви, і, відповідно, напруги u_1 і u_2 будуть різними внаслідок наявності у вимірювальному каналі "перешкоди" у вигляді багатовісної тканини 6. Така різниця

$u_1 - u_2$ також оцифровується аналого-цифровим перетворювачем 14 і надходить до промислового комп'ютера 15.

Амплітудний і фазовий тіньові акустичні методи контролю можуть використовуватися як окремо, так і разом.

Технічними засобами на основі таких методів можна контролювати, наприклад, поверхневу густину багатовісної тканини (яка може бути різною в різних місцях по площі такої тканини внаслідок використання в цих місцях різної кількості в'язучої речовини) (див. рис. 4).

Також, наприклад, можна контролювати товщину одного з шарів багатовісної тканини (див. рис. 5).

Крім цього, наприклад, можна контролювати наявність непроклеювання між шарами багатовісної тканини (див. рис. 6).

Неруйнівний акустичний контроль можна здійснювати одночасно в кількох характерних точках багатовісної тканини, використовуючи або паралельно кілька пар зразкових / вимірювальних каналів, або послідовно обходячи такі точки [7]. В якості чутливих елементів електроакустичних випромінювачів 4 і 5 та акустоелектричних приймачів 7 і 8 звичайно використовується п'єзоелектрична кераміка, коефіцієнти електро-механічного зв'язку, відносна діелектрична про-



Рис. 4. Багатовісна тканина з різною кількістю в'язучої речовини

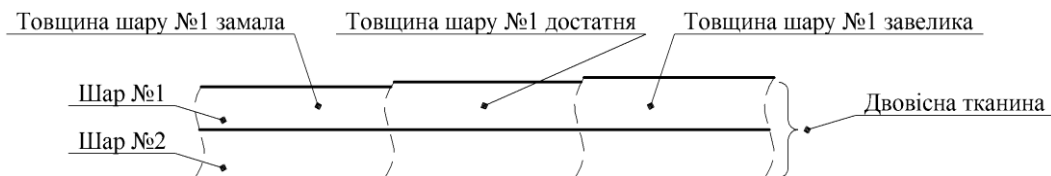


Рис. 5. Багатовісна тканина з різною товщиною одного з шарів

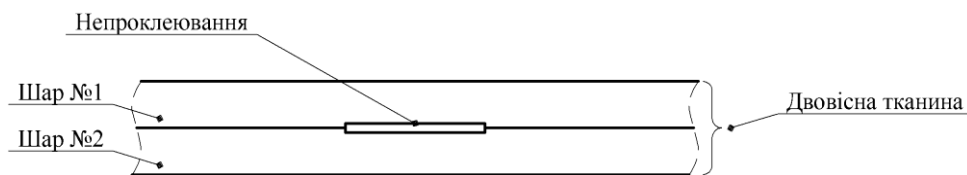


Рис. 6. Багатовісна тканина з непроклеюванням між шарами

никність і інші параметри якої від партії до партії можуть відрізнятися на (10...15...20)%. Але шляхом калібрування попередніх підсилювачів та амплітудних / фазових детекторів вплив неоднаковості властивостей п'єзоелектричної кераміки можна практично повністю уникнути.

Неруйнівний акустичний контроль доцільно використовувати тоді, коли необхідно контролювати тільки якусь одну властивість багатовісної тканини (наприклад, поверхневу густину) за умови, що всі інші її властивості або є практично незмінними, або змінюються несуттєво. Досвід проведення розрахунків і експериментів [8, 9, 10] показує, що таку поверхневу густину σ [г/м²] можна однозначно зв'язати або з загасан-

ням у вигляді $\sigma = f(u_1/u_2)$, або з фазовим зсувом у вигляді $\sigma = f(u_1 - u_2)$, або одночасно з ними обома – принаймні, в невеликому діапазоні її зміни.

Ще однією перевагою неруйнівного акустичного контролю (див. рис. 2 і рис. 3) є те, що він дуже добре піддається автоматизації і інтегруванню в різноманітні комп'ютерно-інтегровані системи керування і SCADA-системи.

Висновки. В статті показано, що неруйнівний акустичний контроль властивостей текстильних матеріалів, і, зокрема, багатовісних тканин є перспективним напрямом, який може бути застосований як доповнення до "традиційних" руйнівних методів контролю таких матеріалів.

Список літератури:

1. EN 13473:2001 Reinforcement – Specifications for multi-axial multi-ply fabrics – Part 1: Designation (Армування – Специфікації для багатовісних багат шарових тканин – Частина 1: Позначення).
2. EN 13473:2001 Reinforcement – Specifications for multi-axial multi-ply fabrics – Part 2: Methods of test and general requirements (Армування – Специфікації для багатовісних багат шарових тканин – Частина 2: Методи випробувань і загальні вимоги).
3. EN 13473:2001 Reinforcement – Specifications for multi-axial multi-ply fabrics – Part 3: Specific requirements (Армування – Специфікації для багатовісних багат шарових тканин – Частина 3: Спеціальні вимоги).
4. ISO 3374:90 Textile glass mats – Determination of mass per unit area (Текстильні скломати – Визначення маси на одиницю площі).
5. ISO 1886:90 Reinforcement fibres – Sampling plans applicable to received batches (Армуючі волокна – Плани відбору проб, які застосовуються до отриманих партій).
6. ДСТУ 2865-94 Контроль неруйнівний. Терміни та визначення.
7. Лісовець С.М. Контроль поверхневої густини текстильних матеріалів шляхом використання автоматизованої скануючої системи / С.М. Лісовець, С.В. Барилко, А.С. Зенкін, В.Г. Здоренко. *Метрологія та прилади*. 2019. № 5 (79). С. 52–55. DOI: 10.33955/2307-2180(5)2019.52-55.
8. Здоренко В.Г. Застосування фазового та амплітудно-фазового акустичних методів для автоматизованого контролювання поверхневої щільності текстильних матеріалів / В.Г. Здоренко, С.В. Барилко, С.М. Лісовець, Д.О. Шипко, Ю.О. Дерій *Стандартизація, сертифікація, якість*. 2019. № 2 (114). С. 86–94.
9. Здоренко В.Г. Дослідження проходження ультразвукових хвиль крізь двошаровий матеріал із складною структурою при контролі його технологічних параметрів / В.Г. Здоренко, С.В. Барилко, С.М. Лісовець, Д.О. Шипко. *Вісник КНУТД*. 2020. № 1 (142). С. 50–62. DOI:10.30857/1813-6796.2020.1.5.
10. Здоренко В.Г. Застосування ультразвукового пристрою для визначення поверхневої густини текстильної волоконної маси / В.Г. Здоренко, С.В. Барилко, С.М. Лісовець, Д.О. Шипко. *Вісник КНУТД*. 2020. № 5 (150). С. 67–73. DOI:10.30857/1813-6796.2020.5.6.

Lisovets S.M., Kiva I.L., Guida O.G. NON-DESTRUCTIVE ACOUSTIC CONTROL OF SURFACE DENSITY AND OTHER PROPERTIES OF MULTI-AXIAL FABRICS: ADVANTAGES AND DISADVANTAGES

The article is devoted to means of researching the properties of some textile materials, which have long been used by people in large quantities in everyday life and industrial activities, and their assortment, depending on the purpose, is very diverse. In the conducted research, fabrics related to textile materials consisting of several layers of threads placed relative to each other in different directions (along different axes) were considered – these are the so-called multi-axial fabrics. It states that the properties of textile materials are usually controlled using various destructive methods, when a sample (fragment) of the textile material is first obtained, and then its properties are measured and analyzed. It was also established that the main disadvantage of destructive control methods is the lack of efficiency when it is necessary to control the textile material (multi-axial fabric), for example, in the production process, quickly assessing its properties and influencing,

if necessary, the technological process of its manufacture. It is known that acoustic control methods that use non-contact acoustic transducers and are non-destructive can be used as a supplement and sometimes as a replacement for existing destructive methods. It has been established that in such cases, shadow methods are appropriately used, when the acoustic transducers are located on different sides of the multi-axial fabric. It was also established that in the case of controlling one property of a multi-axial fabric, for example, the surface thickness, the thickness of one of the layers, or non-gluing, it usually has an unambiguous effect on the attenuation or phase shift of acoustic vibrations, or on both of them at the same time. The research also confirmed that non-destructive acoustic monitoring is well suited to automation and integration into various computer-integrated control systems and SCADA systems.

Key words: *multi-axial fabric, layer fixing mechanism, surface density, chemical weaving system, thread layer.*

Олещенко Л.М.

Національний технічний університет України

«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

ПРОГРАМНЕ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ДЛЯ АНАЛІЗУ ДАНИХ ПЛАТФОРМИ YOUTUBE

У цій статті розглянуто програмні інструменти, призначені для аналізу даних платформи YouTube, наведено огляд їх функціональності та основних можливостей. Розроблено програмне забезпечення, яке дозволяє виконувати статистичний аналіз даних про відео, виділяти тематики відео здійснювати інтелектуальний аналіз даних, який може бути корисним для аналітиків, маркетологів та створювачам контенту.

Графічний інтерфейс програмного забезпечення розроблено за допомогою інструментів мови програмування Python, використано середовище Jupyter-Notebook, бібліотеки NumPy, Pandas, Matplotlib, Seaborn, Scikit-learn, TensorFlow. Реалізована програмна система дозволяє опрацьовувати дані у вигляді таблиць csv, в першу чергу, з сервісу Kaggle, звідки було узято дані для виконання аналізу даних.

У результаті дослідження створено програмне забезпечення для роботи з даними, для операцій відкриття, зчитування, інтерпретації та візуалізації даних. Програмне забезпечення складається з окремих функціональних блоків, кожен з яких містить невелику кількість програмного коду, та відповідає за виконання певного обмеженого набору функцій з завантаження та підготовки даних, а також їх подальшого аналізу різними методами. Реалізовані методи для інтелектуального аналізу даних, такі як лінійна регресія, розрахунок кореляцій, агрегація табличних даних.

Набір даних складається з понад 350 000 годин відео. Для зменшення місць зберігання та обчислень використано заздалегідь обчислені та стислі функції, які дають змогу тренувати модель на наборі даних менше, ніж за день на одному графічному процесорі. Відеоролики попередньо були оброблені для отримання 1.3 мільярдів візуальних функцій та 1.3 мільярдів аудіофункцій. Було витягнуті функції на рівні відео, а також функції на рівні кадрів та сегментів (при роздільній здатності 1 секунди). Візуальні ознаки були вилучені за допомогою моделі анотацій зображення Inception-V3, підготовленої на ImageNet. Звукові функції були витягнуті за допомогою звукової моделі VGG на попередній версії YouTube-8M. І візуальні, і аудіофункції були оброблені алгоритмом PCA та квантовані для розміщення на одному жорсткому диску. Комбінований набір усіх функцій має розмір менше 2 ТБ. Лексика цільової анотації складається з 3862 сутностей графу знань, включаючи як грубі, так і дрібні сутності, які були напіваавтоматично створено та перевірені вручну за рейтингами для візуального розпізнавання. Кожна сутність має щонайменше 200 відповідних відеоприкладів. Ground truth для кожного відео визначені системою анотацій відео YouTube на основі вмісту, метаданих, контекстуальних та користувачьких сигналів, є основними темами кожного відео.

Ключові слова: інтелектуальний аналіз даних, YouTube, програмне забезпечення, технології програмування Python, машинне навчання, відеохостинг, відеоаналітика, YouTube Data API, YouTube Analytics, метрики відеоаналітики, візуалізація даних.

Постановка проблеми. YouTube є найбільш популярною платформою для завантаження, перегляду та спільного використання відеоконтенту. Кожної хвилини на YouTube завантажується понад сотні годин відео, що створює величезний обсяг даних, які можна проаналізувати для розуміння трендів, виявлення популярного контенту та виявлення нових можливостей для залучення аудиторії. Актуальність даного дослідження полягає в постійному зростанні важливості цієї платформи як основного джерела відеоконтенту та інформації для користувачів у всьому світі. З роз-

ширенням обсягів відео та аудиторії YouTube стає все важливіше дослідження та аналіз великих обсягів даних, щоб зрозуміти тенденції, попит, споживчі звички та ефективність контенту. Розробка програмного забезпечення, спрямованого на аналіз даних YouTube, відповідає на потребу в інструментах для отримання цінної інформації з цієї платформи для різноманітних цілей, включаючи маркетинг, дослідження громадської думки, розвиток контенту та аналіз трендів.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. YouTube – це велика відеоплатформа, що дозволяє

користувачам завантажувати, переглядати та ділитися відеоконтентом. Заснований у 2005 році і придбаний компанією Google у 2006 році, YouTube став найпопулярнішим сервісом відеохостингу у світі. YouTube містить різноманітний контент, від коротких відео-блогів до повнометражних фільмів, і використовується мільйонами користувачів щодня для розваг, навчання та спілкування. Огляд наукових статей про YouTube розкриває різноманітні аспекти відеоконтенту та соціальних мереж, що включають культурну участь, вплив та кореляцію в соціальних мережах, рекомендаційні системи та статистику відео. Наприклад, у статті [1] обговорюється роль платформи YouTube у створенні нової, спільної форми онлайн-культури та її вплив на ширші культурні та соціальні традиції. У статті Наамана, Боасе та Лая [2] аналізується вміст потоків соціальної обізнаності, які використовуються в комп'ютерній спільній роботі для підвищення обізнаності щодо конкретних тем. Автори стверджують, що зміст цих потоків стосується не лише теми, яка розглядається, але й людей, які беруть участь, та їхніх стосунків. Вони пропонують метод аналізу вмісту цих потоків, заснований на концепції «егоцентричного вбудовування», яка передбачає представлення людей, залучених у потік, як вузли на графі, а вміст потоку як межі між ними. Автори демонструють корисність цього методу, аналізуючи вибіркового потік соціальної обізнаності та порівнюючи результати з більш простим аналізом на основі частоти ключових слів.

У роботі [3] досліджуються способи зв'язку впливу та кореляції в соціальних мережах і надається детальний аналіз теми. Автори використовують дані з різних джерел, щоб підтвердити свої висновки та представити свою роботу в чіткій і стислій формі. Загалом ця стаття є важливим внеском у сферу аналізу даних соціальних мереж і дає цінну інформацію про стосунки між різними особами та групами в онлайн-спільнотах.

У статті [4] представлено метод об'єднання конкуруючих думок із соціальних мереж для покращення рекомендацій фільмів. Метод передбачає агрегування думок кількох користувачів і їх використання для створення рекомендацій. У роботі наведені експерименти та результати, що свідчать про ефективність запропонованого методу.

У роботі [5] представлено систему рекомендацій для YouTube, який є вебсайтом для обміну відео. Система рекомендацій базується на підході колаборативної фільтрації, що означає, що вона

рекомендує відео користувачам на основі шаблонів відео, які переглядали схожі користувачі. У статті описано модель та оцінку системи рекомендацій, яка використовувалася для рекомендації відео користувачам YouTube.

Автори статті [6] проаналізували роль систем рекомендацій у збільшенні переглядів відео на YouTube. Вони виявили, що система рекомендацій мала значний вплив: 10% найпопулярніших відео в їх наборі даних отримали 62% від загальної кількості переглядів. Дослідження показало, як можна оптимізувати алгоритми рекомендацій, щоб покращити залученість на таких платформах, як YouTube.

Автори статті [7] аналізують структуру інфраструктури YouTube, включаючи систему зворотного зв'язку з користувачами, яка дозволяє глядачам взаємодіяти з відео, надавати оцінки та коментарі. Вони вважають, що ця система зворотного зв'язку має вирішальне значення для розуміння соціальної динаміки платформи та надання рекомендацій користувачам. У документі представлено кілька прикладів, щоб проілюструвати різні способи взаємодії користувачів на YouTube і як це впливає на типи вмісту, який завантажуються та рекомендований.

У роботі [8] досліджено використання теорії графів для аналізу соціальних мереж і поведінки перегляду користувачів YouTube. Автори зібрили дані про взаємодію користувачів YouTube і використали теорію графів для моделювання соціальних мереж і вимірювання центральності. У документі підкреслюється важливість центральності для розуміння соціальних мереж на YouTube і представлено кілька показників центральності, які використовуються в аналізі. Дослідження дає цінну інформацію про структуру та динаміку соціальних мереж на YouTube і про те, як вони впливають на поведінку перегляду.

Постановка завдання. Метою статті є розробка програмного забезпечення, яке дозволить виконувати статистичний аналіз даних про відео, виділяти тематики відео та виконувати інтелектуальний аналіз даних, який може бути корисним для аналітиків, маркетологів та створювачам контенту, а також для трансферного навчання та підходів до адаптації домену для відео.

Виклад основного матеріалу. Наявні програмні інструменти для аналізу даних платформи YouTube надають широкі можливості для розуміння та вивчення відеоконтенту, користувацьких взаємодій та трендів у споживанні контенту.

YouTube Data API – це інтерфейс програмування застосунків від YouTube, який надає доступ до різноманітної інформації про відео, канали, коментарі, статистику та інше. З його допомогою можна отримати доступ до публічної інформації та використовувати її для аналізу та обробки даних.

YouTube Analytics – це інструмент від YouTube, який надає детальну аналітику щодо відеоконтенту та каналів. YouTube Analytics дозволяє аналізувати кількість переглядів, час перегляду, реакції глядачів, заробіток та інші метрики для кращого розуміння ефективності контенту.

Social Blade – це зовнішній сервіс, який надає аналіз статистики каналів YouTube, включаючи підписників, перегляди, рейтинги та інші метрики. Social Blade також надає інструменти для порівняння каналів та вивчення трендів у споживанні контенту.

Tubular Labs – це інструмент для аналізу відеоконтенту на YouTube та інших платформах соціальних медіа. Tubular Labs надає розширену аналітику щодо залученості аудиторії, впливу відео та рекламних кампаній, а також допомагає знаходити та вивчати впливових творців контенту.

vidIQ – це розширення для веббраузера, яке надає розширену аналітику для каналів та відео на YouTube. vidIQ допомагає аналізувати ключові слова, рекомендації для покращення контенту, а також надає звіти про конкурентів та аудиторію.

Деякі програми спеціально розроблені для аналізу вмісту відео та аудіофайлів, такі як розпізнавання облич, аналіз настрою, виявлення об'єктів та інші. Інші програми спеціалізуються на виявленні трендів у відеоконтенті та ключових словах. Розглянуті програмні інструменти надають різноманітні можливості для аналізу даних платформи YouTube, що дозволяє власникам каналів, маркетологам та дослідникам приймати обґрунтовані рішення на основі даних.

Незважаючи на широку функціональність, розглянуті програмні інструменти для аналізу даних платформи YouTube також мають свої недоліки. Один з них полягає у обмеженому доступі до даних через API YouTube або обмеженнях, накладених самою платформою. Деякі інструменти можуть працювати повільно або недостатньо ефективно при обробці великих обсягів даних. Крім того, аналітичні дані можуть бути неповними або недостатньо точними, що може призвести до неточних висновків. Можливі шляхи вдосконалення включають розширення функціональності API та забезпечення біль-

шого доступу до даних, оптимізацію алгоритмів обробки великих обсягів даних та розробку алгоритмів для підвищення точності аналітики та забезпечення достовірних результатів.

Аналіз даних сервісу YouTube за допомогою технологій програмування Python

Доступ до програмного забезпечення здійснюється з локального комп'ютера або віддаленого сервера з будь-якою ОС. Для роботи з даними використовується мова програмування Python 3.6 та Jupyter Notebook. Тому вони мають бути встановлені та налаштовані на комп'ютері. У першу чергу, щоб налаштувати середовище для аналізу даних, потрібно перейти до локального середовища програмування або середовища програмування на основі сервера. Для коректної роботи програмного забезпечення мають бути встановлені додаткові пакети, такі як pandas, numpy, matplotlib, seaborn, tensorflow. Тому виконуємо таку команду в терміналі:

```
pip install pandas numpy tensorflow matplotlib seaborn
```

Далі запускаємо Jupyter Notebook у теці з програмним забезпеченням:

```
jupyter notebook
```

Потім ми виконуємо код, який містить файл `youtube_analyser.ipynb`. Для дослідження даних відео-сервісу Youtube було обрано датасет на сервісі відкритих даних Kaggle, обсягом 500Мб, з різними даними про понад 8 мільйонів відео, що розміщено на сервісі. YouTube-8M – це масштабний датасет відеоматеріалів із міткою, який складається з мільйонів ідентифікаторів відео YouTube, з високоякісними примітками із словника з 3800 візуальних сутностей. Він постачається з попередньо обчисленими аудіовізуальними функціями з мільярдів кадрів та аудіо-сегментів, розроблених для розміщення на одному жорсткому диску. Це дає можливість тренувати потужну базову модель на цьому наборі даних менше ніж за день на одному графічному процесорі. У той же час, масштаб і різноманітність набору даних можуть дати можливість глибокому вивченню складних аудіовізуальних моделей, які можуть тривати тижні, щоб навчитися навіть розподіленим способом.

Відеозаписи відбираються рівномірно, щоб зберегти різноманітне розповсюдження популярного вмісту на YouTube з урахуванням кількох

обмежень, вибраних для забезпечення якості та стабільності набору даних:

- кожне відео має бути загальнодоступним і мати не менше 1000 переглядів;
- кожне відео має тривати від 120 до 500 секунд;
- кожне відео має бути пов'язане щонайменше з однією сутністю з цільової лексики (класом);
- вміст для дорослих та чутливий видаляється (як визначено автоматизованими класифікаторами).

Набір даних представляє понад 350 000 годин відео і зазвичай потребує сотень терабайт пам'яті. Для оброблення цього набору даних (з обробкою відео в режимі реального часу на один процесор) знадобиться також 50-ти річне обчислення процесорами. Для зменшення місць зберігання та обчислювальних місць використовуються заздалегідь обчислені та стислі функції, які дають змогу тренувати модель на цьому наборі даних менше, ніж за день, на одному графічному процесорі. Відеоролики попередньо було оброблено для отримання 1.3 мільярдів найсучасніших візуальних функцій та 1.3 мільярдів аудіофункцій. Ми витягуємо функції на рівні відео, а також функції на рівні кадрів та сегментів (при роздільній здатності 1 секунди). Візуальні особливості були вилучені за допомогою моделі анотацій зображення Insertion-V3, підготовленої на ImageNet.

Звукові функції були витягнуті за допомогою звукової моделі VGG. І візуальні, і аудіофункції були оброблені алгоритмом PCA та квантовані для розміщення на одному жорсткому диску. Комбінований набір усіх функцій має розмір менше 2 ТБ.

Лексика цільової анотації складається з 3862 сутностей графу знань, включаючи як грубі, так і дрібні сутності, які були напівавтоматично створені та перевірені вручну за рейтингами, щоб бути візуально впізнаваними. Кожна сутність має щонайменше 200 відповідних відео-прикладів. Суб'єкти об'єднані в 24 вертикалі на високому рівні (рис. 1).

Ground truth для кожного відео, визначені системою анотацій відео YouTube на основі вмісту, метаданих, контекстуальних та користувацьких сигналів, є основними темами кожного відео. Кількість міток Ground truth на відео коливається від 1 до 23, в середньому 3,01 на відео.

У кожного відео є:

- id: унікальний ідентифікатор для відео, при тренуванні – це відео-ідентифікатор YouTube, а в тесті / валідації ці дані є анонімізовані;
- мітки: список міток цього відео;
- кожен кадр має RGB: float масив довжиною 1024;
- кожен кадр має аудіо: float масив довжиною 128.

У більшості пошукових запитів в мережі Інтернет пошук і ранжування відео виконується

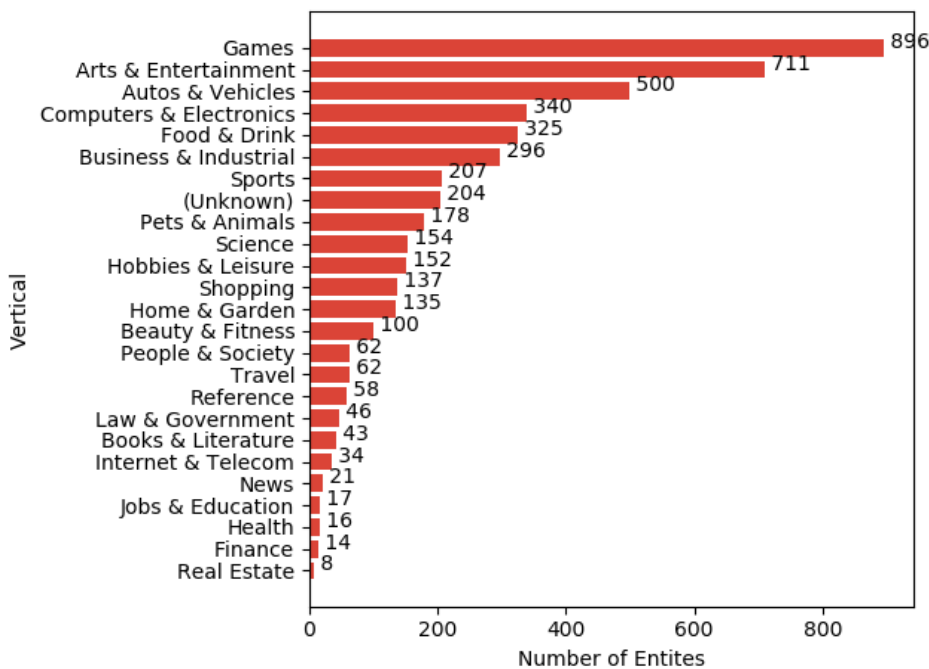


Рис. 1. Розподіл кількості сутностей за тематиками у відео

шляхом узгодження термінів запиту з метаданими та іншими сигналами рівня відео. Однак ми знаємо, що відео може містити теми, які не завжди є бажаними для користувача, наприклад, у відео з назвою та метаданими, що відповідають розважальним відео чи відео з тваринами, може зустрітись зовсім інший контент усередині, адже створювачі контенту можуть навмисно підлаштувати метадані для більшого обсягу переглядів. Локалізація тематик на основі не метаданих, а контенту самого відео може включати такі програми, як покращений пошук відео, узагальнення відео та виділення основних моментів, виявлення моментів дії, що допоможе у поліпшенні безпеки відеоконтенту та багатьох інших задачах. У разі успіху цієї місії Youtube, нові моделі машинного навчання значно покращать розуміння відео для всіх, не лише визначаючи теми, що стосуються відео, а й визначатимуть, де у відео вони з'являються, що може як економити час користувачів, так і захистити їх від фейкового та нерелевантного контенту.

Створене програмне забезпечення міститися у Jupyter Notebook середовищі, програмне забезпечення подається у вигляді окремих функціональних блоків, кожен з яких містить невелику кількість програмного коду, та відповідає за виконання певного обмеженого набору функцій з завантаження та підготовки даних, а також їх подальшого аналізу різними методами. Головна особливість такої побудови програмного забезпечення є його доступність, та гнучкі можливості з тестування окремих блоків, та «нелінійного» виконання. А саме, мається на увазі те, що код не

компілюється у єдину монолітну структуру програмного забезпечення, яка має початок (зазвичай це функція main), і кінець роботи. У IPython-ноутбукці є можливим почленне виконання блоків, проведення одних і тих самих операцій декілька разів, інплейс тестування створених методів та багато іншого. Саме такі можливості є важливими при роботі з даними, адже завжди необхідно переглядати проміжні результати, виводити дані, щоб впевнитись у їх коректності. Навчання моделей може займати багато часу, і при невірних чи непротестованих модулях, об'єднувати їх у один чи декілька файлів може завдати значних втрат у часі на виконання некоректного коду.

Розроблене програмне забезпечення містить наступні модулі.

Модуль завантаження даних та бібліотек відповідає за підключення усіх необхідних бібліотек для машинного навчання, аналізу даних, побудови графіків тощо. Також цей модуль завантажує дані з таблиць, та фреймів бібліотеки TensorFlow для подальшого опрацювання. Нижче наведено фрагмент коду, який здійснює імпорт необхідних бібліотек (рис. 2).

Далі ми опрацьовуємо файли тестового датасету, завантажуюмо зміст файлів у пам'ять (рис. 3).

Далі ми зчитуємо таблицю сутностей (рис. 4).

Модуль візуалізації даних виконує побудову стовпчикових діаграм, графів зв'язку та іншої інформації.

На рис. 5 виведено 30 найбільш поширених тематик сутностей у представленому датасеті.

Оперуючи даними з таблиці, ми можемо побудувати графіки для нашого дослідження, інфор-

```
import numpy as np # linear algebra
import pandas as pd # data processing, CSV file I/O (e.g. pd.read_csv)
import seaborn as sns
import matplotlib.pyplot as plt
import csv
import networkx as nx
from subprocess import check_output
from wordcloud import WordCloud, STOPWORDS
import tensorflow as tf
from IPython.display import YouTubeVideo
plt.style.use('ggplot')

# Input data files are available in the "../input/" directory.
# For example, running this (by clicking run or pressing Shift+Enter) will list the files in the input directory

import os
print(os.listdir("../input"))

import warnings
warnings.filterwarnings('ignore')
```

Рис. 2. Імпорт необхідних бібліотек

```

vid_ids = []
labels = []

for example in tf.python_io.tf_record_iterator(frame_lvl_record):
    tf_example = tf.train.Example.FromString(example)
    vid_ids.append(tf_example.features.feature['id']
                  .bytes_list.value[0].decode(encoding='UTF-8'))
    labels.append(tf_example.features.feature['labels'].int64_list.value)

print('Number of videos in this tfrecord: ', len(vid_ids))
print('Number of labels in this tfrecord: ', len(labels))
print('Picking a youtube video id:', vid_ids[15])

```

Number of videos in this tfrecord: 1015
 Number of labels in this tfrecord: 1015
 Picking a youtube video id: FF00

Рис. 3. Зчитування TFrecord файлу

```

vocabulary = pd.read_csv('./vocabulary.csv')
vocabulary.head()

```

Index	TrainVideoCount	KnowledgeGraphId	Name	WikiUrl	Vertical1	Vertical2	Vertical3	WikiDescription	
0	0	788288	/m/03bt1gh	Game	https://en.wikipedia.org/wiki/Game	Games	NaN	NaN	A game is structured form of play, usually und...
1	1	539945	/m/01mw1	Video game	https://en.wikipedia.org/wiki/Video_game	Games	NaN	NaN	A video game is an electronic game that invol...
2	2	415890	/m/07yv9	Vehicle	https://en.wikipedia.org/wiki/Vehicle	Autos & Vehicles	NaN	NaN	A vehicle is a mobile machine that transports ...
3	3	378135	/m/01jdz	Concert	https://en.wikipedia.org/wiki/Concert	Arts & Entertainment	NaN	NaN	A concert is a live music performance in front...
4	4	286532	/m/09jwl	Musician	https://en.wikipedia.org/wiki/Musician	Arts & Entertainment	NaN	NaN	A musician is a person who plays a musical ins...

```

vocabulary.info()

```

```

<class 'pandas.core.frame.DataFrame'>
RangeIndex: 1000 entries, 0 to 999
Data columns (total 9 columns):
Index                1000 non-null int64
TrainVideoCount      1000 non-null int64
KnowledgeGraphId     1000 non-null object
Name                 988 non-null object
WikiUrl              988 non-null object
Vertical1            1000 non-null object
Vertical2            153 non-null object
Vertical3            12 non-null object
WikiDescription      988 non-null object
dtypes: int64(2), object(7)
memory usage: 78.4+ KB

```

Рис. 4. Відображення інформації з таблиці сутностей

мація з яких може бути доволі корисною, враховуючи те, що було проведено попередні перевірки якості та актуальності датасету. На рис. 6 зображено граф зв'язків різних сутностей, в залежності від того, наскільки часто відео з спільними тематиками зустрічались у даних.

Модуль аналізу даних виконує аналіз даних за різними критеріями, у ньому містяться імплементації методів машинного навчання та статистичного аналізу даних, візуалізація результатів дослідження.

У цьому модулі представлено реалізації методів лінійної регресії, підрахунку кореляцій між змінними та інші методи статистичного аналізу даних.

Спочатку було проаналізовано вміст датасету, кількість його елементів, тощо (рис. 7).

Далі було проаналізовано розподіл різних метрик, побудовано графіки (рис. 8), та підраховано квантілі метрик. Також було порівняно категорії відео за мірою їх наявності у датасеті, проаналізовано розподіл переглядів між категоріями, те саме було проаналізовано для лайків, дизлайків та коментарів під відео.

Було проведено аналіз інтересу до відео певних категорій, в залежності від кількості лайків, дизлайків та коментарів (рис. 9) і було отримано цікаві результати дослідження, а саме:

- коментарі найбільше впливають на інтерес до відео у категоріях How To, Peoples & Blogs, Entertainment;

```
In [31]: labels_count_dict = dict(top_n)
labels_count_df = pd.DataFrame.from_dict(labels_count_dict, orient='index').reset_index()
labels_count_df.columns = ['label', 'count']
labels_count_df['label'] = labels_count_df['label'].map(label_mapping, na_action='ignore')
TOP_labels = list(labels_count_df['label'][:n])
fig, ax = plt.subplots(figsize=(10,7))
sns.barplot(y='label', x='count', data=labels_count_df)
plt.title('Top {} labels with sample count'.format(n))

Out[31]: Text(0.5, 1.0, 'Top 30 labels with sample count')
```

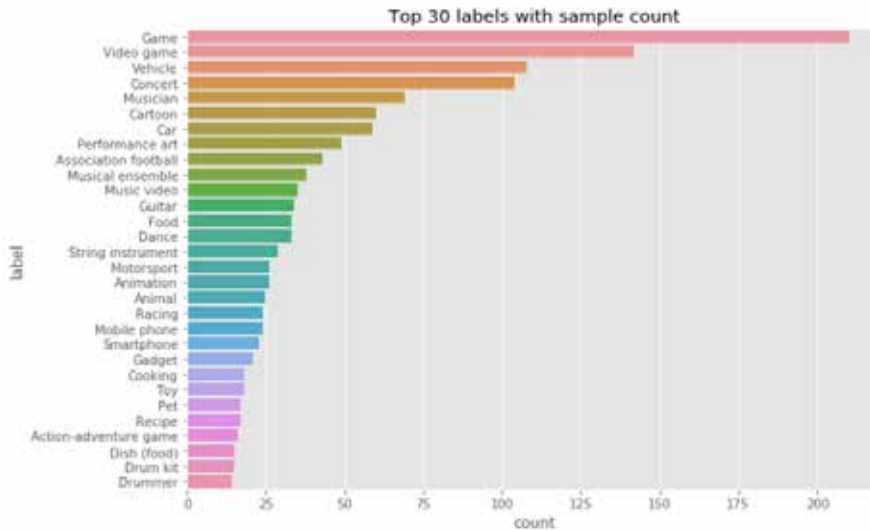


Рис. 5. Діаграма популярних тематик сутностей



Рис. 6. Граф зв'язків основних тематик у датасеті

```
In [4]: df_yout = pd.read_csv("./USvideos.csv")
```

```
In [5]: #Looking some information of the data
print(df_yout.shape)
print(df_yout.nunique())
```

```
(40949, 16)
video_id          6351
trending_date     285
title             6455
channel_title     2207
category_id       16
publish_time      6269
tags              6055
views             40478
likes             29850
dislikes          8516
comment_count     13773
thumbnail_link    6352
comments_disabled 2
ratings_disabled  2
video_error_or_removed 2
description       6901
dtype: int64
```

Рис. 7. Загальна інформація про датасет

- дизлайки очікувано впливають на заволікання людей до відео з категорії Politics;
- кількість лайків дуже важлива для категорії «Музика», про що варто замислитися музикантам початківцям, лейблам, орієнтованим на США.

Також у рамках дослідження було побудовано матрицю кореляцій для параметрів, щоб отримати відносну оцінку їх зв'язку один з одним. З отриманої матриці (рис. 10) впли-

ває, що лайки та дизлайки дуже слабо пов'язані, що є логічно, адже різні люди за різними критеріями незалежно одне від одного ставлять їх, також видно, що кількість коментарів трохи більше пов'язана з лайками, ніж з дизлайками, проте зв'язок все одно не дуже сильний. Також було проведено додаткові аналізи тегів та згенеровано діаграми ключових слів, що зустрічається у тегах та назвах.

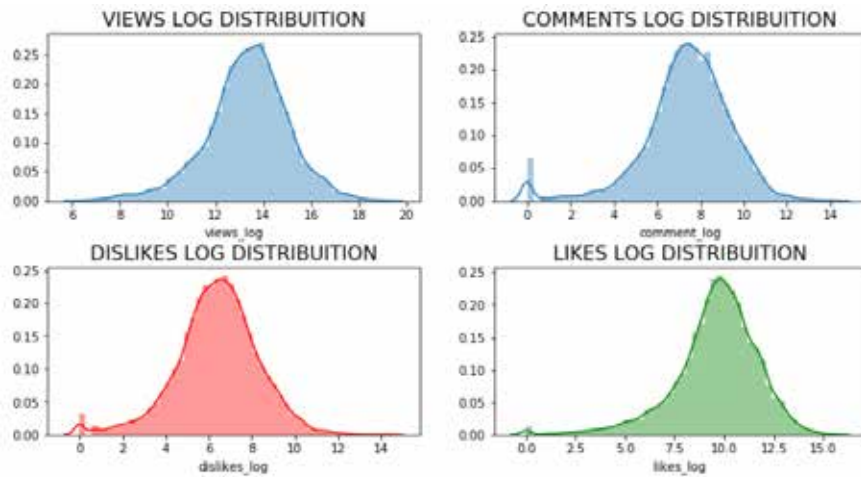


Рис. 8. Розподіл значень метрик відео

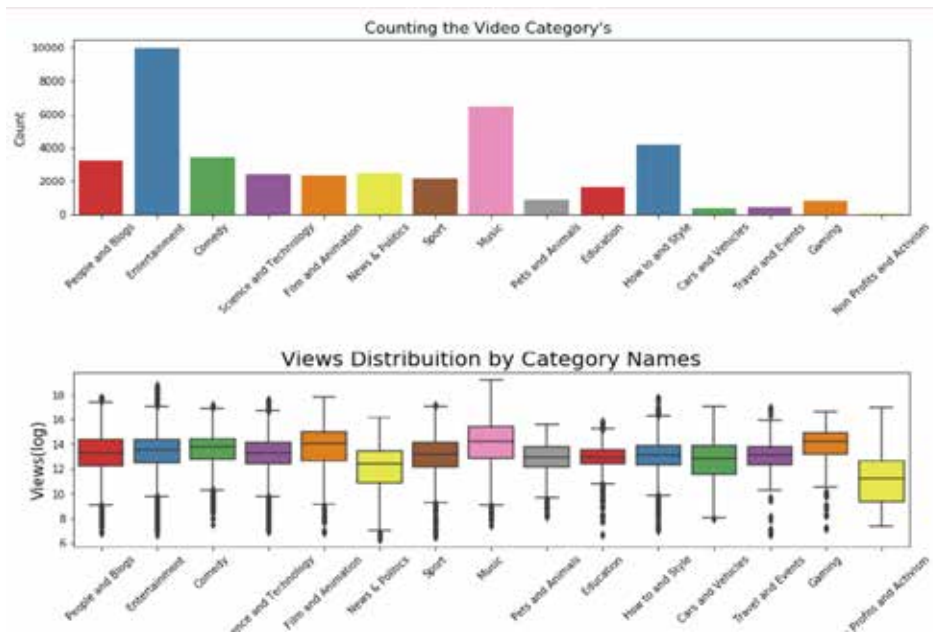


Рис. 9. Кількість представлених відео по категоріям, розподіл переглядів між категоріям

За допомогою бібліотек мови Python є можливим реалізація поглибленого аналізу, візуалізації даних та машинного навчання. При цьому завдяки простоті та інтуїтивності мови та її синтаксису, для виконання цих складних операцій не витрачається багато часу на саме програмування, а більше часу приділяється самому аналізу та концепції (рис. 11).

При аналізі інтересу до відео в залежності від обраних метрик, ми ввели до даних нові змінні, а саме відношення обраної метрики до загальної кількості переглядів, що вимірюється у відсотках (рис. 12).

Ця метрика показує, яка кількість користувачів, з тих, хто переглянув відео, потім зробив ту

чи іншу дію по відношенню до цього відео (лайк, дизлайк, коментар). Код до цієї частини аналізу наведено нижче (рис. 13).

Висновки. У даному дослідженні створено програмне забезпечення для операцій відкриття, зчитування, інтерпретації та візуалізації даних платформи YouTube. Програмне забезпечення подається у вигляді окремих функціональних блоків, кожен з яких містить невелику кількість програмного коду, та відповідає за виконання певного обмеженого набору функцій з завантаження та підготовки даних, а також їх подальшого аналізу різними методами. Реалізовані методи для інтелектуального аналізу даних, такі як лінійна регресія, розрахунок кореляцій, агрегація табличних даних.

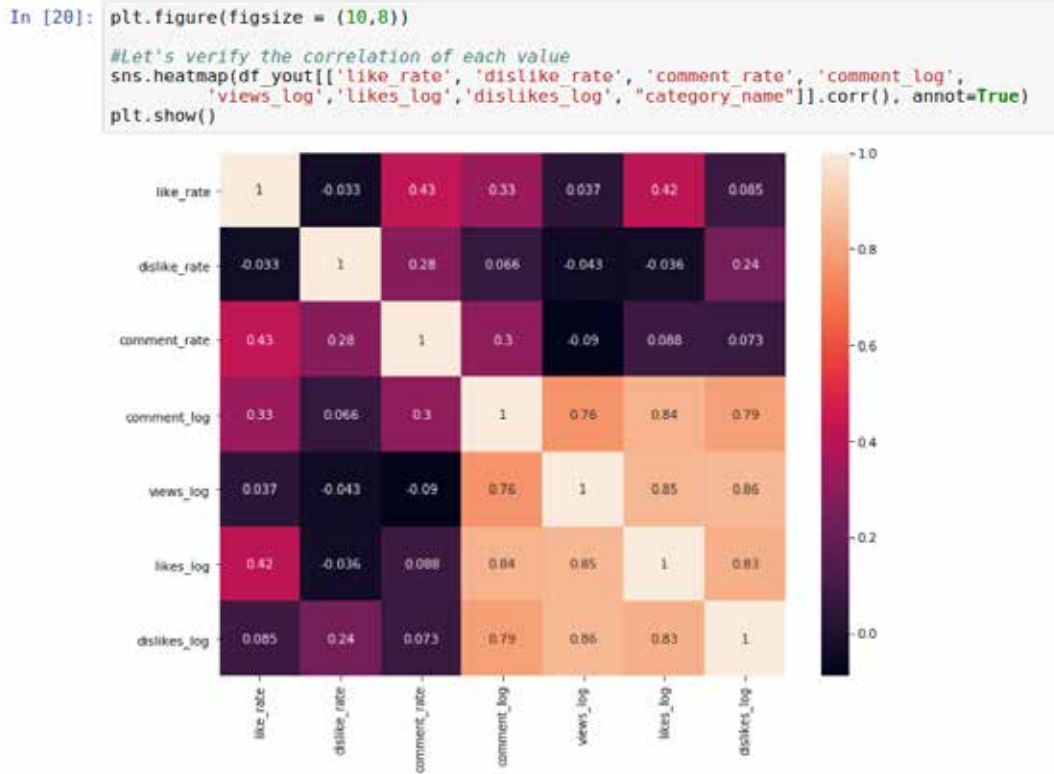


Рис. 10. Матриця кореляцій метрик відео

```
print("Category Name count")
print(df_yout.category_name.value_counts()[:5])

plt.figure(figsize = (14,9))

plt.subplot(211)
g = sns.countplot('category_name', data=df_yout, palette="Set1")
g.set_xticklabels(g.get_xticklabels(),rotation=45)
g.set_title("Counting the Video Category's ", fontsize=15)
g.set_xlabel("", fontsize=12)
g.set_ylabel("Count", fontsize=12)

plt.subplot(212)
g1 = sns.boxplot(x='category_name', y='views_log', data=df_yout, palette="Set1")
g1.set_xticklabels(g.get_xticklabels(),rotation=45)
g1.set_title("Views Distribution by Category Names", fontsize=20)
g1.set_xlabel("", fontsize=15)
g1.set_ylabel("Views(log)", fontsize=15)

plt.subplots_adjust(hspace = 0.9, top = 0.9)
plt.show()
```

Рис. 11. Аналіз категорій та побудова графіків за допомогою Python

Одним з подальших напрямків роботи може бути поглиблене дослідження попиту та споживчих звичок аудиторії YouTube, включаючи вивчення впливу різних факторів на перегляди та взаємодію з контентом. Крім того, можна дослідити розвиток нових технологій штучного інте-

лекту для отримання більш глибокого розуміння тенденцій та структури відеоконтенту на YouTube. Такі дослідження можуть допомогти покращити якість контенту, зрозуміти потреби аудиторії та оптимізувати стратегії маркетингу та розвитку каналів на цій платформі.

```
df_yout['likes_log'] = np.log(df_yout['likes'] + 1)
df_yout['views_log'] = np.log(df_yout['views'] + 1)
df_yout['dislikes_log'] = np.log(df_yout['dislikes'] + 1)
df_yout['comment_log'] = np.log(df_yout['comment_count'] + 1)

plt.figure(figsize = (12,6))

plt.subplot(221)
g1 = sns.distplot(df_yout['views_log'])
g1.set_title("VIEWS LOG DISTRIBUTION", fontsize=16)

plt.subplot(224)
g2 = sns.distplot(df_yout['likes_log'],color='green')
g2.set_title('LIKES LOG DISTRIBUTION', fontsize=16)

plt.subplot(223)
g3 = sns.distplot(df_yout['dislikes_log'], color='r')
g3.set_title("DISLIKES LOG DISTRIBUTION", fontsize=16)

plt.subplot(222)
g4 = sns.distplot(df_yout['comment_log'])
g4.set_title("COMMENTS LOG DISTRIBUTION", fontsize=16)

plt.subplots_adjust(wspace = 0.2, hspace = 0.4,top = 0.9)

plt.show()
```

Рис. 12. Аналіз розподілів метрик відео

```
plt.figure(figsize = (14,6))

g = sns.boxplot(x='category_name', y='likes_log', data=df_yout, palette="Set1")
g.set_xticklabels(g.get_xticklabels(),rotation=45)
g.set_title("Likes Distribution by Category Names ", fontsize=15)
g.set_xlabel("", fontsize=12)
g.set_ylabel("Likes(log)", fontsize=12)
plt.show()
```

а)

```
plt.figure(figsize = (14,6))

g = sns.boxplot(x='category_name', y='dislikes_log', data=df_yout, palette="Set1")
g.set_xticklabels(g.get_xticklabels(),rotation=45)
g.set_title("Dislikes distribution by Category's", fontsize=15)
g.set_xlabel("", fontsize=12)
g.set_ylabel("Dislikes(log)", fontsize=12)
plt.show()
```

б)

```
plt.figure(figsize = (14,6))

g = sns.boxplot(x='category_name', y='comment_log', data=df_yout, palette="Set1")
g.set_xticklabels(g.get_xticklabels(),rotation=45)
g.set_title("Comments Distribution by Category Names", fontsize=15)
g.set_xlabel("", fontsize=12)
g.set_ylabel("Comments Count(log)", fontsize=12)

plt.show()
```

в)

Рис. 13. Фрагменти коду для роботи з новими метриками

Список літератури:

1. Burgess J. YouTube: Online video and participatory culture. *International journal of cultural studies*. 2008. 11(1). pp. 31-44. DOI: 10.1177/1367877907089475.
2. Naaman M., Boase J. and Lai C.H. Is it really about me? Message content in social awareness streams. *Proceedings of the 2010 ACM conference on Computer supported cooperative work*. 2010. pp. 189-192. DOI: 10.1145/1718918.1718957.
3. Yang K., Kunegis J., Lommatzsch A. and Staab S. Influence and correlation in social networks. *Proceedings of the 20th international conference on World wide web*. 2011. pp. 7-8. DOI: 10.1145/1963405.1963506.

4. Zhang L., Liu B. and Zhang Y. Aggregating competing opinions from social networks for movie recommendation. *Proceedings of the 23rd international conference on Computational Linguistics*. 2010. pp. 1224-1232. DOI: 10.5555/1858681.1858817.
5. Davidson J., Liebald B., Liu J., Nandy P. and Van Vleet T. The YouTube video recommendation system. *Proceedings of the fourth ACM conference on Recommender systems*. 2010. pp. 293-296. DOI: 10.1145/1864708.1864770.
6. Zhou Renjie et al. The impact of YouTube recommendation system on video views. *ACM/SIGCOMM Internet Measurement Conference*. 2010. pp. 404-410. DOI: 10.1145/1879141.1879193.
7. Wattenhofer M., Wattenhofer R., & Zhu Z. The YouTube Social Network. *Proceedings of the International AAAI Conference on Web and Social Media*. 2021. 6(1), pp. 354-361. <https://doi.org/10.1609/icwsm.v6i1.14243>.
8. Cheng Xu et al. Statistics and Social Network of YouTube Videos. *2008 16th International Workshop on Quality of Service*. 2008. pp. 229-238.

Oleshchenko L.M. YOUTUBE PLATFORM DATA ANALYSIS SOFTWARE

This article discusses the software tools designed to analyze data from the YouTube platform, provides an overview of their functionality and main capabilities. Software has been developed that allows to perform statistical analysis of large volumes of video data, highlight video themes and make intelligent data analysis that can be useful for analysts, marketers and content creators. The graphical interface of the software was developed using Python programming language tools, the Jupyter-Notebook environment, NumPy, Pandas, Matplotlib, Seaborn, Scikit-learn, TensorFlow libraries were used. The implemented software system allows to process data in the form of csv tables, first of all, from the Kaggle service, from where the data was taken for research and data analysis.

As a result of the research, software was created for working with data, for the operations of opening, reading, interpreting and visualizing data. The software is provided in the form of separate functional blocks, each of which contains a small amount of software code, and is responsible for performing a certain limited set of functions for loading and preparing data, as well as their further analysis by various methods. Implemented methods for intelligent data analysis, such as linear regression, calculation of correlations, aggregation of tabular data.

The dataset consists of over 350,000 hours of video. Precomputed and compressed features are used to reduce storage and computation space, allowing the model to be trained on a dataset in less than a day on a single GPU. Videos have been pre-processed to obtain 1.3 billion state-of-the-art visual features and 1.3 billion audio features. Video-level features, as well as frame- and segment-level features (at 1 second resolution) were extracted. Visual features were extracted using the Inception-V3 image annotation model prepared on ImageNet. The sound features were extracted using the VGG sound model on the previous version of YouTube-8M. Both visual and audio features were PCA processed and quantized to fit on the same hard disk. The combined set of all features is less than 2 TB in size. The target annotation vocabulary consists of 3862 knowledge graph entities, including both coarse and fine entities, which were semi-automatically generated and manually checked against ratings for visual recognition. Each entity has at least 200 relevant video examples. Ground truth for each video is determined by YouTube's video annotation system based on content, metadata, contextual and user signals, are the main topics of each video.

Key words: data mining, YouTube, software, Python programming technologies, machine learning, video hosting, video analytics, YouTube Data API, YouTube Analytics, video analytics metrics, data visualization.

Петренко Д.В.

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

Протасов А.Г.

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

ОГЛЯД СУЧАСНИХ ТЕХНОЛОГІЙ ПІДВИЩЕННЯ АВТОНОМНОСТІ МОБІЛЬНИХ КОЛІСНИХ РОБОТІВ

У статті розглядаються дослідження, які направлені на удосконалення алгоритмів керування мобільними колісними роботами. Сьогодні мобільні колісні роботи є невід'ємною складовою ряду високотехнологічних сфер, включаючи промисловість, медицину, сільське господарство, логістику та повсякденне життя. Вони знаходять широке застосування у доставці, складській логістиці, обслуговуванні пацієнтів у лікарнях, а також в різних аспектах сільського господарства. Розвиток інтелектуальних систем керування дозволяє цим роботам стати все більш автономними та ефективними, відкриваючи нові можливості для підвищення продуктивності та покращення якості життя. Проведені різними групами науковців дослідження методів навчання роботів можна розділити на дві групи: навчання одиночних роботів та групи мобільних колісних роботів. Ряд авторів працюють над розвитком алгоритмів навігації роботів, які базуються на отриманих зображеннях. Актуальною залишається проблема навігації мобільних роботів в динамічних середовищах, яка потребує вдосконалення інтелектуальних систем керування для забезпечення ефективного та безпечного руху, як одного так і групи роботів. Автори розробляють концепцію розрідженого рою, яка передбачає можливість координувати свої дії навіть на значних відстанях один від одного. Піднімається проблема ефективного планування та координації дій систем з багатьма роботами у складних незв'язаних середовищах, де існує обмежена або ненадійна комунікаційна інфраструктура. Дослідниками пропонується новий епістемічний підхід до планування, який дозволяє роботам враховувати невизначеність та здатність до адаптації при відсутності зв'язку. Вирішення таких проблем дозволить значно підвищити ефективність застосування роботів у соціальній і професійній сферах діяльності людини.

Ключові слова: мобільні колісні роботи, інтелектуальні системи керування, автономність, машинне навчання, штучний інтелект.

Постановка проблеми. Колісні мобільні роботи є важливою складовою сучасної робототехніки та автоматизації. Початки їх розвитку сягають далекої історії, проте суттєвий прогрес у цій галузі був досягнутий в останні десятиліття. Роботи з колісною базою відрізняються маневреністю та здатністю до переміщення по різноманітному покриттю. Вони використовуються у багатьох сферах, зокрема в промисловості, медицині, логістиці, сільському господарстві тощо. Розвиток сучасних технологій дав поштовх для вдосконалення колісних мобільних роботів, включаючи вдосконалення систем керування за рахунок штучного інтелекту для автономності, розширення функціональності за рахунок додавання різноманітних сенсорів, а також підвищення продуктивності, надійності та безпеки. У сучасному світі колісні мобільні роботи відіграють ключову роль

у вирішенні багатьох завдань, що стоять перед суспільством, таких як автоматизація виробництва, рятувальні операції, обслуговування інфраструктури, дослідження невідомих або небезпечних територій тощо. Незважаючи на досягнені успіхи, інтелектуальні системи керування рухом мобільних роботів потребують подальшого розвитку. Це включає в себе постійне вдосконалення алгоритмів, розширення функціональності для роботи в нових умовах, а також розробку нових методів координації та співпраці між роботами. Тільки через постійні дослідження та інновації інтелектуальні системи керування рухом мобільних роботів зможуть ефективно відповідати на виклики сучасного технологічного світу.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Метою останніх досліджень стало пошук алгоритмів обробки даних і машинного навчання, удо-

сконалення систем збору інформації про навколишнє середовище для адаптації робота до змін у реальному часі. Ці системи дозволяють роботам ефективно орієнтуватися в різних умовах, уникати перешкод, планувати оптимальні маршрути та співпрацювати у групах для досягнення загальних цілей. Важливість інтелектуальних систем керування рухом мобільних роботів полягає в їх здатності до автономної роботи в реальних умовах, що робить їх незамінними для застосування у різних сферах.

Інтелектуальні системи керування для колісних мобільних роботів базуються на синтезі різних технологій, включаючи машинне навчання [1, 2], штучний інтелект [3, 4], аналіз даних, системи глобального і локального позиціонування [5, 6], тощо. Науковці активно працюють над розробкою алгоритмів, які дозволять роботам ефективно орієнтуватися в різних умовах, адаптуватися до змін оточення та виконувати завдання з високою точністю.

Однією з ключових областей досліджень є розробка систем штучного інтелекту, які дозволяють роботам самостійно приймати рішення на основі отриманих даних [7]. Крім того, науковці активно вивчають аспекти безпеки та взаємодії з людьми для розробки систем, які забезпечать безпечне співіснування колісних мобільних роботів та людей в різних сферах діяльності [8].

Постановка завдання. Метою даної роботи є аналіз сучасних автоматизованих технологій керування мобільним колісним роботом, та визначення напрямку подальшого розвитку цих технологій.

Виклад основного матеріалу. Використання нейронних мереж та глибинного навчання дозволяє роботам адаптуватися до нових ситуацій та розвивати стратегії дій, що покращує їхню продуктивність та витрати ресурсів.

1. Навчання одиночних роботів

У дослідженні [9] автори зосередилися на розвитку алгоритмів навігації роботів, які базуються на зображеннях. Відзначається, що із зростанням популярності технологій, що використовують зображення для візуального керування роботами, стає важливим розв'язання проблеми вибору оптимальних дій алгоритмів навігації на основі отриманих зображень.

У попередніх дослідженнях автори використовували методи, які базувалися на мінімізації вартості переходу між станами для вибору дій робота. Однак ці підходи не завжди були ефективними, особливо коли кінцева ціль розташована далеко від початкової. У зв'язку з цим, автори

запропонували нову метрику, відому як досяжність завдання, яка дозволяє оцінити ефективність дій робота при плануванні шляху на основі зображень. Щоб оцінити досяжність завдання, автори розробили прямий та непрямий підходи. Перший полягав у навчанні моделі на основі трансформатора зору, яка безпосередньо виводила метрику з вхідних зображень. Другий підхід передбачав прогнозування майбутнього стану робота відповідно до запланованого шляху і використання цього прогнозу для оцінки досяжності завдання (рис. 1).

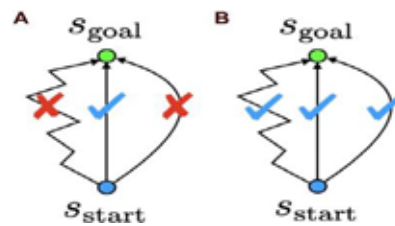


Рис. 1. Концептуальна різниця між традиційним плануванням маршрутів – оптимальним (А) та запропонованим – не обов'язково оптимальним (В) [9]

Експерименти, проведені в змодельованому середовищі, схожому на вітальню, показали успішність планування шляху з використанням нової метрики, навіть у випадках, коли інші підходи не були ефективними. Однак в ході дослідження виявлено проблеми з нестабільністю навігації та коливаннями, над якими автори планують працювати в подальших дослідженнях.

У статті [10] було проведено дослідження порівняльного аналізу двох підходів до створення автономних агентів з метою вирішення складних завдань. Перший підхід базується на глибокому навчанні з підкріпленням DRL (Deep Reinforcement Learning), в той час як другий використовує моделі поведінки людини, засновані на динамічному програмуванні з математичною оптимізацією DPMP (Dynamical Perceptual-Motor Primitives).

У роботі досліджувалася ефективність обох підходів в умовах виконання різних завдань, враховуючи їхню здатність адаптуватися до змінних умов та навколишнього середовища. Автори звернули увагу на переваги та недоліки кожного підходу, зокрема, на складність налаштування та надмірну чутливість до змін у випадку агентів DRL, а також на складності врахування індивідуальних структур винагороди для моделей DPMP.

Крім того, автори пропонують гібридний підхід DPMP-DRL, який поєднує переваги обох під-

ходів та дозволяє досягти кращих результатів в створенні автономних агентів. Цей гібридний підхід надає можливість моделям DRL вивчати процеси прийняття рішень на високому рівні, зберігаючи стабільність динаміки дій за допомогою моделей DPMP. Дане дослідження сприяє розумінню та розвитку методів створення автономних агентів у різних сферах застосування штучного інтелекту.

Актуальна проблема навігації мобільних роботів в динамічних середовищах розглядається в роботі [11]. Навіть за наявності різноманітних методів навігації, виникає необхідність у вдосконаленні ефективних та надійних підходів, здатних вирішувати проблеми оптимальної навігації в реальному часі та уникнення зіткнень. У роботі пропонується новий алгоритм логарифмічної увігнутої моделі прогнозуючого контролера (MPC), який розв'язує зазначені проблеми за допомогою унікального підходу до формулювання функцій вартості та динамічних обмежень. Основою алгоритму є структура рекурентної нейронної мережі (RNN), яка порівнюється з іншим інструментом оптимізації CVXOPT. Застосування нейронних мереж у поєднанні з прогностичним контролером моделі розв'язує проблеми оптимального керування локально поблизу робота, забезпечуючи обчислювальну ефективність та здатність працювати з нелінійними та складними системами (рис. 2).

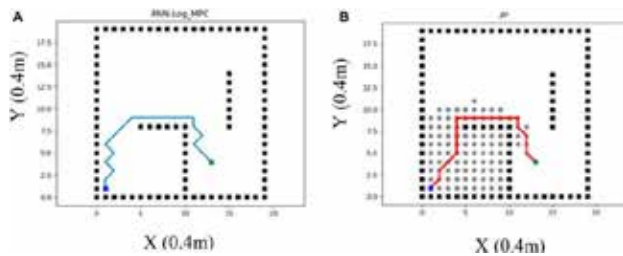


Рис. 2. Метод планування шляху RNN у статичному середовищі [11]

У результаті дослідження доведено успішне впровадження та оцінку запропонованого алгоритму, який перевершує інші методи, такі як RRT, A-Star і LQ-MPC, з точки зору надійності та швидкості. Подальші дослідження автори бачать у застосовності методології в реальних умовах за допомогою симуляторів, таких як Gazebo або VREP, для додаткового підтвердження та отримання більш детальної інформації щодо результатів.

У роботі [12] пропонується структура, спрямована на подолання проблеми розрідженості

даних навчання з глибоким підкріпленням (DRL) у складних областях. Це досягається через розробку методології навчання агенту DRL та його інтеграцію у автомобільне середовище. Запропонована методологія використовує доступні домени для навчання агенту вирішувати навігаційні проблеми, такі як уникнення перешкод, і дозволяє агенту узагальнювати складні та недоступні домени, наприклад, морське середовище, з мінімальним подальшим навчанням.

Основними елементами запропонованої методології є інтеграція агенту DRL на високому рівні керування автомобілем та використання існуючого планування маршруту і методів контролю низького рівня, які вже використовуються в різних доменах. В результаті розроблено пакет автономії з третинним багаторівневим контролером, який дозволяє агенту DRL взаємодіяти на встановленому високому рівні керування та бути відокремленим від динаміки автомобіля та обмежень навколишнього середовища.

Прикладом використання цієї методології є глибокий алгоритм навчання Deep Q Network (DQN), який навчається у змодельованому наземному середовищі і перевіряється на його здатність узагальнювати між різними доменами, такими як морське середовище. Експериментальна перевірка включала в себе змодельоване середовище водної поверхні та реальне розгортання роботизованих платформ як на наземному, так і на водному середовищі (рис. 3).

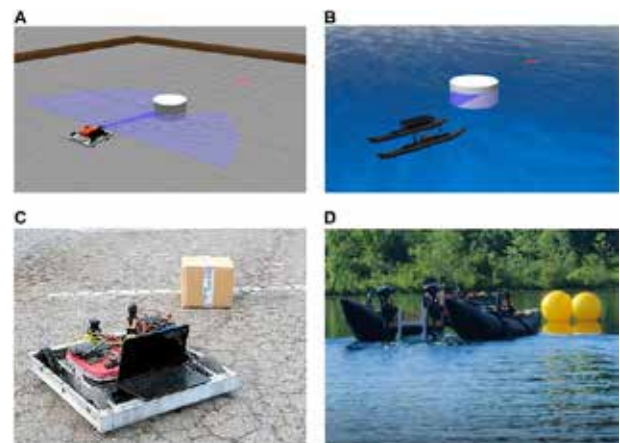


Рис. 3. Уникнення перешкод під час моделювання (А, В) і у реальному світі (С, D) [12]

Отримані результати показують, що запропонована методологія дозволяє ефективно використовувати доступні та багаті даними наземні домени для розробки агентів DRL для навігації автономних надводних апаратів. Це зменшує час і витрати, пов'язані з навчанням у складних сфе-

рах реального світу, і дозволяє установам, які не мають доступу до моря, розробляти агентів для морських застосувань.

Новий підхід до автономної навігації мобільних роботів, що поєднує традиційні методи глобального та локального планування з методами глибокого навчання з підкріпленням (DRL) пропонують автори статті [13]. Зазначається, що підвищення точності автономної навігації у середовищі з динамічними перешкодами є актуальною проблемою, і традиційні методи навігації часто недостатньо ефективні для її вирішення. Автори вказують, що хоча DRL може стати альтернативою традиційним методам, час навчання цих моделей може бути значно великим, а відсутність довгострокової пам'яті може ускладнювати роботу мобільних роботів у реальних умовах.

Для вирішення цих проблем автори пропонують нову систему автономної навігації, яка комбінує традиційні методи планування шляху з DRL. У цій системі глобальне планування шляху виконується за допомогою традиційних алгоритмів, потім визначаються важливі орієнтири на шляху, і лише після цього використовується DRL для переміщення робота до цих орієнтирів. Це дозволяє значно зменшити складність навчання робота.

Додатково, автори розробили мережу вилучення функцій з модулями пам'яті, що дозволяє зберігати довготривалу залежність входних функцій, щоб вирішити проблему відсутності довгострокової пам'яті при навчанні DRL.

Стаття представляє результати порівняння запропонованих методів з традиційними підходами до навігації та DRL. Виявлено, що запропонований метод виявився ефективнішим у багатьох аспектах, зокрема, в часі навігації, безпеці та надійності.

2. Особливості навчання групи роботів

Робота [14] присвячена ітеративному підходу до навчання групи мобільних роботів для досягнення групового колективного руху. Автори пропонують метод, який дозволяє учневі, здатному розпізнавати груповий рух, ефективно використовувати свої знання для налаштування стабільної колективної поведінки на різних платформах роботів. Цей підхід, відомий як перехідне навчання, спирається на невеликий початковий набір даних від кожної платформи, що може бути зібраний з випадкових рухів. Подальше оновлення бази знань відбувається за допомогою ітеративного підходу.

Автори, для перевірки запропонованого підходу, використовують дві платформи роботів –

імітовані роботи Pioneer 3DX та реальні роботи Sphero BOLT. Експерименти показали, що застосування цього методу дозволяє автоматично налаштувати стабільну колективну поведінку на обох платформах. Отже, дослідження вносять важливий внесок у розуміння та розвиток методів налаштування колективної поведінки мобільних роботів за допомогою ітеративного підходу до навчання передачі.

Дослідження, описане в статті [15], присвячене аналізу сприйняття користувачами ройової робототехніки на робочому місці та розгляду принципів проектування для успішного впровадження таких систем у реальних програмах. Автори провели три якісні дослідження, в яких взяли участь 37 учасників з трьох секторів соціальної інфраструктури: пожежно-рятувальної служби, організації зберігання та служби огляду мостів. На рис. 4 показано можливі сценарії застосування групи роботів.

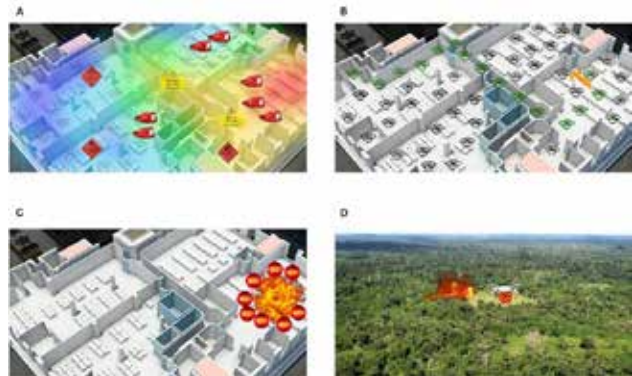


Рис. 4. Можливі сценарії застосування, (А) збір інформації в палаючій будівлі, (В) знаходження шляхів для евакуації, (С) гасіння пожежі, (D) гасіння лісової пожежі [15]

Кожне дослідження включало в себе фокус-групи та інтерв'ю, спрямовані на вивчення сприйняття користувачами ройових систем, їхніх вимог та реакції на зграї роботів, які надають підтримку в різних професійних сценаріях. Загальною тенденцією є позитивне сприйняття групи роботів для збору інформації та автоматизації простих процесів. Проте, учасники виявили певні застереження щодо автономних рішень ройових систем, особливо в контексті прийняття рішень, де людина вважається більш переважною.

Особливу увагу було приділено взаємному формуванню, методології, що спрямована на створення дво-направлених відносин між користувачами та розробниками технологій. Це дозволяє враховувати суспільний вибір на всіх етапах досліджень і розробок, щоб підвищити рівень сприйняття та розуміння робототехніки роїв.

В статті [16] автори досліджують вплив топології мережі на колективну поведінку рою роботів у динамічних середовищах, зокрема, у сценаріях пошуку їжі. Основною метою є вивчення впливу безмасштабного зв'язку на здатність рою реагувати на зміни в навколишньому середовищі шляхом аналізу колективної відповіді змодельованого рою з різними типами мережевої топології.

У роботі використовується модель динамічного середовища зміни щільності їжі, яка є реалістичним аспектом більшості реальних сценаріїв. Порівняння здійснюється між мережами безмасштабного типу та альтернативними топологіями мережі, такими як безконтактні мережі. Автори розглядають два типи змін у середовищі: одноразову різку зміну та періодичні зміни.

Результати дослідження свідчать про те, що безмасштабні мережі сприяють прискоренню процесу колективної реакції рою на зміни в навколишньому середовищі. Однак це супроводжується зменшенням узгодженості колективних рішень. Автори вважають, що використання безмасштабних мереж може покращити продуктивність рою завдяки двом побічним ефектам: спілкування на великих відстанях та частій регенерації мережі. Такий підхід дозволяє зменшити просторові кореляції поведінки рою та збагачує вибірку інформації.

Дослідження, що представлено в статті [17], спрямоване на вирішення проблеми масштабування груп роботів для спільної дії на великих відстанях. Автори ставлять перед собою завдання розробити концепцію розрідженого рою та дослідити її застосування у різних прикладних сценаріях. Це дослідження є актуальним в контексті потреби в масштабованих групах роботів для дії в різних середовищах, таких як ліси, а також для вирішення завдань у сфері робототехніки. Автори вказують, що існуючі моделі роїв роботів, які базуються на щільних зграях, непрактичні для застосувань, що вимагають спільної дії на великих відстанях через обмеження щодо близькості та обмежені можливості взаємодії між роботами.

Автори розробляють концепцію розрідженого рою, яка передбачає, що роботи можуть координувати свою дію навіть на значних відстанях один від одного. Ілюструється застосування цієї концепції у різних сценаріях, зокрема в лісовому середовищі, де група марсоходів повинна пройти та контролювати ліс. Крім того, у дослідженні висвітлені теоретичні питання, які виникають у контексті розрідженого рою, такі як продуктивність групи, типи взаємодій, що мають місце,

і можливість реалізації концепції на різних масштабах.

Стаття [18] присвячена проблемі ефективного планування та координації дій систем з багатьма роботами у складних незв'язаних середовищах. Автори звертають увагу на те, що багато застосувань робототехніки, такі як пошук і порятунок, допомога при стихійних лихах і інспекційні операції, відбуваються в умовах, де існує обмежена або ненадійна комунікаційна інфраструктура.

У статті запропоновано новий епістемічний підхід до планування, який дозволяє роботам враховувати невизначеність та здатність до адаптації при відсутності зв'язку. Епістемічне планування дозволяє роботам аналізувати та розширювати свої переконання щодо стану системи та інших роботів у системі. Це дає можливість кожному роботу активно реагувати на зміни у навколишньому середовищі та координувати свої дії з іншими роботами.

Для розв'язання проблеми оптимального планування в умовах обмеженого зв'язку, автори використовують алгоритм оптимізації розподілу завдань з протоколом пліток, що поєднується з механізмом епістемічного планування. Цей підхід дозволяє роботам ефективно реагувати на втрату зв'язку та продовжувати спільні операції в умовах обмеженої комунікації. Результати показують значне скорочення часу виконання місії порівняно з альтернативними методами, що свідчить про успішність запропонованого підходу (рис. 5). Автори наголошують на важливості подальших досліджень у цьому напрямку, зокрема, вирішення проблем динамічної тривалості завдань та оптимізація розподілу завдань для більших багатороботних систем. Крім того, планується дослідження можливостей використання епістемічних марковських процесів для досягнення консенсусу в умовах складних невизначених середовищ.

Порівняльний аналіз п'яти різних підходів до створення карт помітності для агентів Deep Reinforcement Learning (DRL), які навчаються на іграх проводиться авторами статті [19]. Карти помітності вказують на те, наскільки кожен піксель на екрані пов'язаний з прийнятими рішеннями агентів. Автори відзначають, що дотепер не існувало робіт, які б оцінювали та порівнювали точність різних підходів до карт помітності на основі збурень, спеціально розроблених для агентів DRL. Автори проводять аналіз залежності від вивчених параметрів основної глибокої Q-мережі агентів і вірності їхніх міркувань. Вони виявля-

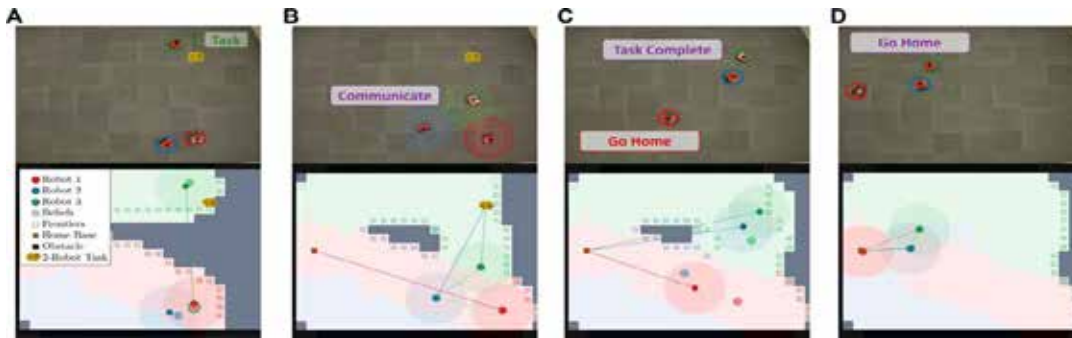


Рис. 5. Експеримент з одним завданням та трьома роботами, (А) робот 3 знаходить завдання, (В) комунікація та визначення виконавців, (С) роботи 2 і 3 виконують завдання, робот 1 повертається додому, (D) роботи 2 і 3 повертаються додому [18]

ють, що більшість підходів до карт помітності дійсно залежать від параметрів, вивчених агентом. При цьому, заміна початкового обчислення релевантності, що враховує аналіз усієї дії, на обчислення, що розглядає лише конкретну дію, може покращити залежність від параметрів.

Автори підкреслюють важливість подальшого дослідження підходів до карт помітності на основі збурень. Зазначають, що дослідникам варто вирішити, які типи збурень є важливими для їхніх досліджень та вибрати відповідний метод збурення, враховуючи специфіку агентів DRL.

Висновки. Наукові дослідження, які розглядаються у цій статті спрямовані на розробку інтелектуальних систем керування рухом, як одного так і групи мобільних колісних роботів. Метою таких систем є забезпечення автономності, точності та надійності, для її досягнення використовують синтезі різних технологій, включаючи аналіз даних, штучний інтелект, машинне навчання та інше. Головними проблемами які постають є безпека орієнтації та наві-

гації в незнайомому статичному і динамічному середовищах. Найбільш популярними, для вирішення цієї проблеми на сьогодні, є застосування різних методів машинного навчання та їх комбінування для швидкої обробки даних зібраних з сенсорів та камер. Таким чином, напрям подальшого розвитку цих технологій полягає у подальшому вдосконаленні алгоритмів машинного навчання та їх адаптації до різних умов експлуатації. Крім того, важливим напрямом є пошук ефективних рішень для забезпечення безпеки як самого робота, так і його оточення, включаючи розробку адаптивних стратегій управління для уникнення зіткнень та взаємодії з іншими об'єктами. В цілому, продовження досліджень у напрямку розробки інтелектуальних систем керування колісними мобільними роботами відкриває широкі перспективи для їх застосування в різноманітних галузях, від промисловості та логістики до наукових досліджень небезпечних для здоров'я людини або досліджень важкодоступних місць.

Список літератури:

1. The rise of Machine Learning Robots: Explore machine learning in robotics. *Robotnik Automation S.L. company brochure*. Paterna, Valencia, Spain. 15 June 2023. URL: <https://robotnik.eu/the-rise-of-machine-learning-robots-explore-machine-learning-in-robotics/> (дата звернення: 20.11.2023).
2. How Machine Learning Is Developing Robotics. *Factored company brochure*. Palo Alto, CA, USA. URL: <https://factored.ai/machine-learning-developing-robotics/> (дата звернення: 10.12.2023).
3. Ksheeraj Kandra. Artificial Intelligence and Machine Learning in Robotics. Jul 8, 2021. URL: <https://ksheeraj-kandra.medium.com/artificial-intelligence-and-machine-learning-in-robotics-15948dcc2f56> (дата звернення: 05.11.2023).
4. Mohsen Soori, Behrooz Arezoo, Roza Dastres. Artificial intelligence, machine learning and deep learning in advanced robotics, a review. *Cognitive Robotics*. Volume 3 – 2023 | <https://doi.org/10.1016/j.cogr.2023.04.001>
5. Zhenhuan Long et al. Integrated Indoor Positioning System of Greenhouse Robot Based on UWB/IMU/ODOM/LIDAR. *Sensors*. Volume 22, Issue 13, 2022. <https://doi.org/10.3390/s22134819>
6. GPS/GNSS for Robotic and Autonomous Devices. *Septentrio N.V. company brochure* URL: <https://www.septentrio.com/en/learn-more/gps/gnss-robotic-and-autonomous-devices> (дата звернення: 25.12.2023).
7. Machine Learning and AI In Robotics: Shaping The Future Of Digital Advancements. *Stefanini Group brochure*. Nov. 29, 2023. URL: <https://stefanini.com/en/insights/news/machine-learning-and-ai-in-robotics-shaping-the-future-of-digital-advancements> (дата звернення: 08.11.2023).

8. Research and Development in Robotic Systems. Safe Human-Robot Interaction. *Digest of Fraunhofer IFF*. Magdeburg, Germany. URL: <https://www.iff.fraunhofer.de/en/business-units/robotic-systems/research/human-robot-interaction.html> (дата звернення: 08.02.2024).
9. Yu Ishihara, Masaki Takahashi. Image-based robot navigation with task achievability. *Front. Robot. AI, Sec. Robot Learning and Evolution*. May 31, 2023. Volume 10 – 2023 | <https://doi.org/10.3389/frobt.2023.944375>
10. Lillian M. et al. Navigational Behavior of Humans and Deep Reinforcement Learning Agents. *Front. Psychol. Sec. Cognitive Science*. Sep. 22, 2021. Volume 12 – 2021 | <https://doi.org/10.3389/fpsyg.2021.725932>
11. Mohaghegh M. et al. Optimal predictive neuro-navigator design for mobile robot navigation with moving obstacles. *Front. Robot. AI*. August 09, 2023. Volume 10 – 2023 | <https://doi.org/10.3389/frobt.2023.1226028>
12. Lambert R. et al. Robust ASV Navigation Through Ground to Water Cross-Domain Deep Reinforcement Learning. *Front. Robot. AI*. Sep. 20, 2021. Volume 8 – 2021 | <https://doi.org/10.3389/frobt.2021.739023>
13. Xuanzhi Wang et al. Deep reinforcement learning-aided autonomous navigation with landmark generators. *Front. Neurobot.* Aug. 22, 2023. Vol. 17. <https://doi.org/10.3389/fnbot.2023.1200214>
14. Abpeikar S. et al. Iterative transfer learning for automatic collective motion tuning on multiple robot platforms. *Front. Neurobot.* March 16, 2023. Volume 17 – 2023 | <https://doi.org/10.3389/fnbot.2023.1113991>
15. Daniel Carrillo-Zapata et al. Mutual Shaping in Swarm Robotics: User Studies in Fire and Rescue, Storage Organization, and Bridge Inspection. *Front. Robot. AI*. April 21, 2020. Vol. 7. | <https://doi.org/10.3389/frobt.2020.00053>
16. Ilja Rausch et al. Adaptive Foraging in Dynamic Environments Using Scale-Free Interaction Networks. *Front. Robot. AI*. July 09, 2020. Volume 7 – 2020 | <https://doi.org/10.3389/frobt.2020.00086>
17. Tarapore D., Grob R., Zauner K-P. Sparse Robot Swarms: Moving Swarms to Real-World Applications. *Front. Robot. AI*. July 02, 2020. Volume 7 – 2020. | <https://doi.org/10.3389/frobt.2020.00083>
18. Bramblett L., Bezzo N. Epistemic planning for multi-robot systems in communication-restricted environments. *Front. Robot. AI*. May 23, 2023. Volume 10 – 2023 | <https://doi.org/10.3389/frobt.2023.1149439>
19. Huber T., Limmer B., André E. Benchmarking Perturbation-Based Saliency Maps for Explaining Atari Agents., *Front. Artif. Intell. Sec. AI in Business*. July 13, 2022. Vol. 5 – 2022 | <https://doi.org/10.3389/frai.2022.903875>

Petrenko D.V., Protasov A.G. OVERVIEW OF MODERN TECHNOLOGIES FOR INCREASING THE AUTONOMY OF MOBILE WHEELED ROBOTS

The article deals with research aimed at improving the control algorithms of mobile wheeled robots. Today, mobile wheeled robots are an integral part of a number of high-tech fields, including industry, medicine, agriculture, logistics and everyday life. They are widely used in delivery, warehouse logistics, patient care in hospitals, as well as in various aspects of agriculture. The development of intelligent control systems allows these robots to become increasingly autonomous and efficient, opening up new opportunities for increasing productivity and improving the quality of life. The studies of robot training methods conducted by different groups of scientists can be divided into two groups: training of single robots and groups of mobile wheeled robots. A number of authors are working on the development of robot navigation algorithms based on the received images. The problem of navigation of mobile robots in dynamic environments remains relevant, which requires the improvement of intelligent control systems to ensure efficient and safe movement of both one and a group of robots. The authors develop the concept of a sparse swarm, which provides for the possibility of coordinating their actions even at considerable distances from each other. The problem arises of effective planning and coordination of actions of systems with many robots in complex disconnected environments where there is a limited or unreliable communication infrastructure. The researchers propose a new epistemic approach to planning that allows robots to account for uncertainty and adaptability in the absence of communication. Solving such problems will significantly increase the efficiency of the use of robots in the social and professional spheres of human activity.

Key words: mobile wheeled robots, intelligent control systems, autonomy, machine learning, artificial intelligence.

УДК 681.2.008

DOI <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2024.2/18>

Пилипенко В.О.

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

Шевченко В.В.

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

Гуменюк Т.С.

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

АВТОМАТИЗОВАНА СИСТЕМА КОНТРОЛЮ ПРОЦЕСУ ОБРОБКИ ДЕТАЛЕЙ НА ОСНОВІ ЕЛЕКТРИЧНИХ СИГНАЛІВ

У роботі обґрунтована актуальність створення автоматизованої системи контролю процесу обробки деталей в гнучких виробничих системах.

Впровадження автоматизованої системи у виробництво дозволить підвищити точність обробки деталей та зменшити кількість бракованих деталей, що дасть можливість підвищити продуктивність та знизити собівартість виробництва. Проведено критичний аналіз систем контролю процесу обробки деталей, який показав, що найбільш ефективним засобом є контроль на основі вимірювання електричних сигналів, а саме змінної складової електрорушійної сили. Дослідження показали, що величина і характер змінної складової електрорушійної сили залежить від фізико-механічних властивостей матеріалів інструмента та деталі, фактичної площі торкання, а також процесів тертя та зносу. На основі проведених теоретичних досліджень встановлено взаємозв'язок електричних сигналів, зокрема постійної і змінної складової електрорушійної сили, із рівнем зносом інструменту. Виявлені основні причини генерування електричних сигналів, до яких відносяться екзоелектронна емісія, яка пов'язана з пластичним деформуванням. Запропонований новий метод вимірювання змінної складової електрорушійної сили без конструктивних змін верстата та без електричної ізоляції інструмента та деталі. Розроблена математична модель зносу різального інструменту на основі вимірювання змінної складової електрорушійної сили. Розроблена блок-схема автоматизованої системи контролю процесу обробки деталей на основі електричних сигналів, яка складається з датчиків зносу, дотику та поломки інструмента. Розглянуті ключові елементи та принцип роботи системи. Запропонований пристрій для вимірювання змінної складової електрорушійної сили. Розроблена система контролю процесом обробки деталей на верстатах з ЧПК в умовах використання гнучких виробничих систем, що дозволяє реєструвати критичний знос та поломку різального інструменту, здійснювати його розмірне налаштування безпосередньо на верстаті.

Ключові слова: *контроль процесу обробки, автоматизоване виробництво, гнучкі виробничі системи, знос різальних інструментів, електричні сигнали, змінна складова електрорушійної сили, поломка різального інструменту.*

Постановка проблеми. Збільшення науково-технічного прогресу надзвичайно залежить від автоматизації виробничих процесів, яка в сучасних умовах виробництва реалізується через впровадження автоматизованих верстатних комплексів. Ці комплекси можуть включати в себе окремі верстати з числовим програмним керуванням, автоматичні лінії, модульні автоматичні лінії або гнучкі виробничі системи [1]. Завдяки впровадженню гнучких виробничих систем значно підвищується продуктивність праці і зменшується

кількість працюючих. Однак процес переходу до гнучких виробничих систем відбувається досить повільними темпами, що частково зумовлено відсутністю надійних засобів контролю процесу обробки деталей приладів, таких як стан різального інструменту, вузлів верстатів та пристроїв числового програмного керування [2].

У залежності від умов експлуатації, частка відмов різального інструменту може складати до 63% від загальної кількості відмов верстатів з ЧПК, які оператор усуває. При цьому витрати часу на вияв-

лення та усунення відмов різальних інструментів становлять у середньому 10% загального часу роботи верстатів. Часті відмови різального інструменту на одній позиції часто призводять до виходу з ладу інструментів на наступних операціях і, в більшості випадків, є головною причиною браку продукції і відмов вузлів верстату. Робота з надмірно зношеним різальним інструментом може призвести до втрати дорогого інструментального матеріалу. Використання на виробництві діелектричних інструментальних матеріалів, таких як кераміка, металокераміка, кубічний нітрид бору, потребує розробки нових ефективних методів і засобів контролю процесу обробки деталей приладів. Ці методи і засоби повинні дозволяти без конструктивних змін в устаткуванні здійснювати дистанційний контроль і управління процесом різання матеріалів [3].

На сьогоднішній день, як в українських, так і в зарубіжних наукових колах, інтенсивно проводяться дослідження у галузі обробки матеріалів різанням. Ці дослідження спрямовані на розробку та вдосконалення методів і засобів контролю стану різального інструменту. Незважаючи на досягнуті результати, деякі системи контролю потребують подальшого розвитку та удосконалення з метою підвищення їх швидкодії, роздільної здатності та надійності. Створення ефективних систем контролю працездатності інструменту неможливе без подальших досліджень у фізиці процесу різання та встановлення взаємозв'язку між явищами, що виникають при різанні, та станом різального інструменту [4].

Постановка проблеми. Контроль процесу обробки деталей передбачає реєстрацію його критичного зносу та його ж поломку, а також визначення моментів початку та кінця різання. Для чистових операцій основною функцією засобів контролю буде реєстрація критичного зносу різального інструменту. Тому, перш ніж приступити до аналізу існуючих методів та систем контролю працездатності різального інструменту, розглянемо фізичні основи теорії тертя та зносу інструменту.

Процес зносу різального інструменту не можна розглядати ізольовано від процесу тертя, а встановлення загальних закономірностей процесів тертя та зносу контактуючої пари «інструмент – деталь» дозволить розкрити фізичну основу взаємозв'язку явищ, що супроводжують процес різання, із зносом інструменту і тим самим на науковій основі вести створення систем контролю стану та працездатності різального інструмента.

Враховуючи, що процес різання протікає при високих значеннях відносної деформації, при цьому деформації локалізовані в малому обсязі пластичної зони і швидкість деформації висока, а також, що свіжоутворена поверхня деформованого металу, що зрізається, хімічно чиста, проблема зносу інструменту повинна вирішуватися на базі теорій тертя матеріалів, пластичної деформації, електронної техніки, електромагнітної динаміки, радіаційної фізики, закономірностей адгезійного, абразивного, дифузійного та окисного видів зносу.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. В Україні перші дослідження змінної складової електрорушійної сили, які виникають в процесі обробки деталей, були проведені в 1980 році в Київському політехнічному інституті під керівництвом професора Остаф'єва В. О. [1]. За кордоном відомі дослідження взаємозв'язку електричних сигналів зі зносом різального інструменту [4].

На основі розгляду фізики процесу зношування різального інструменту, встановлено чотири основні види зносу інструменту: абразивний, адгезійний, дифузійний та окисний. Залежно від умов різання може переважати один із цих видів чи діяти одночасно кілька видів.

Механізм абразивного зносу полягає в тому, що тверді вclusions оброблюваного матеріалу, проникаючи в контактні поверхні інструменту, дряпають ці поверхні. Адгезійний знос інструменту – це відрив силами адгезії частинок інструментального матеріалу. Вважається, що основною ознакою схоплювання є утворення металевих зв'язків у результаті спільного пластичного деформування. Високі пластичні деформації, тиск [5] та температура у зоні контакту, а також інтенсивна адгезія при високих швидкостях різання сприяють взаємному дифузійному розчиненню компонентів інструментального та оброблюваного матеріалів. Процес дифузії характеризується коефіцієнтом дифузії, величина якого залежить від температури різання та енергії активації. Пластична деформація, що супроводжує процес різання, збільшує потенційну енергію кристалічних ґрат металу, що полягає у зменшенні роботи виходу електрона.

Методи аналізу та контролю зношування інструменту можна розділити на безпосередні та непрямі, що здійснюються на верстаті та поза верстатом, у процесі різання або перериваючи процес різання.

Прямі передбачають безпосереднє вимірювання параметрів зносу, при цьому контролюється знос (по лунці, що утворюється на передній

поверхні), відстань від різальної кромки до центру лунки, глибина лунки, ширина стрічки зносу по задній поверхні, зменшення обсягу або маси інструменту, розмірний знос різальної кромки, розкид розмірів деталей в партії і т.д. Зазначені параметри можуть бути визначені радіоактивними, оптико-телевізійними, лазерними, електромеханічними, ультразвуковими або пневматичними методами. Суть оптичних методів полягає в тому, що зі зміною зносу змінюється відбивна здатність задньої грані інструмента. У вимірювальному пристрої оптико-електронний датчик фокусує зображення на оптичну щілину, за якою розташовується катод фотопідсилювача. Недоліком способу є висока чутливість до зовнішніх умов експлуатації (запиленість повітря, вплив технологічної рідини і т.д.), що є суттєвою перешкодою для його впровадження у виробничих умовах. Знаючи швидкість і час поширення ультразвуку в середовищі, легко визначити відомий шлях. Встановлено, що методом ультразвукового контролю можна виміряти різницю шляху з точністю ± 2 мкм. Аналіз показав, що температура є домінуючим чинником, що визначає стан різальної частини інструмента. Ріст зносу викликає ріст потужності джерела теплоти, а потім і ріст температури [6]. При більших швидкостях різання температура визначає структуру й властивості інструментального матеріалу, від яких залежить інтенсивність зносу й наробинок до відмови. Знос різального інструменту призводить не тільки до зміни його геометрії, але й викликає зміну процесів, що впливають на віброакустичні коливання [7]. Так, можуть змінюватися пластичні деформації при стружко утворенні й деформації поверхневого шару деталі, змінюються умови наросту-утворення й швидкість руху стружки по передній поверхні, контактні процеси й властивості інструментального матеріалу. У зв'язку з випадковим характером впливу всіх цих процесів і факторів на віброакустичні коливання, а також у зв'язку з випадковим характером самого зносу, частота і амплітуда віброакустичних коливань кореляційно пов'язані зі станом різального інструменту. Недоліком методу віброакустичної емісії є істотне ослаблення сигналу при його проходженні стиків пружної системи верстата. Тому, сигнал повинен зніматися безпосередньо з інструмента, що в деяких випадках є досить складно [3].

Метод контролю стану різального інструменту на основі вимірювання ЕРС є найбільш поширеним у виробництві та найбільш теоретично обґрунтованим [8]. Метод контролю на основі

електрорушійної сили дозволяє отримати інформацію із зони різання про стан різального інструмента безпосередньо шляхом вимірювання електрорушійної сили різання, що генерується в зоні ковзаючого контакту різального інструменту з оброблюваною деталлю. На даний час проведено дуже багато дослідів на основі яких сформовані відношення зміни технологічних режимів обробки та величини зносу різального інструменту на параметр електрорушійної сили, на постійну та змінну його складову, інтенсивність коливань в різних частотних діапазонах. Основна перевага методу полягає у можливості отримання інформації про стан інструменту під час безпосередньої обробки, що дозволяє оперативно реагувати на будь-які зміни і вчасно проводити підтримку та обслуговування інструменту. Розглянутий метод контролю стану різального інструменту на основі вимірювання електрорушійної сили різання дозволяє дуже точно оцінювати стан інструменту та може бути використаний в умовах автоматизованого виробництва [9].

Сигнал електрорушійної сили вважається одним з найбільш інформативних у контексті контролю стану різального інструменту. Цей сигнал містить в собі цінну інформацію про стан інструменту, зокрема про рівень зносу та характер його роботи. Інтенсивність та характер сигналу можуть бути зв'язані з різними параметрами різального процесу, такими як швидкість різання, тип матеріалу чи геометрія інструменту. Тому аналіз сигналу дозволяє не лише виявити наявний знос, але й зробити висновки щодо оптимальних параметрів різання та планування технологічних процесів виробництва.

Постановка завдання. Метою статті є створення автоматизованої системи контролю процесу обробки деталей в умовах гнучких виробничих систем, яка дає змогу забезпечити можливість безперервного моніторингу стану та оцінки зносу різального інструменту в реальному часі, використовуючи електрорушійну силу.

Виклад основного матеріалу. Підвищення ефективності обробки матеріалів різанням вимагає постійного вдосконалення методів контролю стану різального інструменту. Процес різання полягає у формуванні нової поверхні заготовки та витраті енергії на цей процес.

Процеси генерування відбуваються зазвичай за участю зовнішнього джерела, енергія якого витрачається на розрив електричних зв'язків, що існують між зарядами в речовині. При різанні металів такою зовнішньою енергією є механічна енер-

гія, що витрачається на процес відокремлення стружки від заготівлі.

Розподіл цих електронів за енергетичними станами зони провідності визначається розподілом станів у зоні та ймовірністю їх заповнення. Розподіл станів характеризується функцією щільності станів $g(E_e)$, яка виражається у вигляді [10]:

$$g(E_e) = 4\pi \left(\sqrt{\frac{2m_d}{h^2}} \right)^3 \cdot \sqrt{E_e} \quad (1)$$

де E_e – енергія електрона; m_d – ефективна маса щільності станів електронів; h – стала Планка.

Значення енергії Фермі визначається за формулою [10]:

$$E_\phi(o) = \frac{h^2}{2m_d} \left(\frac{3n_e}{8\pi} \right)^{2/3} \quad (2)$$

де n_e – концентрація електронів.

В загальному вигляді енергія електрона визначається так:

$$E_e = \frac{3}{5} E_\phi(o) + \frac{\pi^2 (kT)^2}{4 E_\phi(o)} \quad (3)$$

Перший доданок (3) характеризує середню енергію електрона при нульовій температурі і називається «нульовою» енергією, що має чисто квантову природу. «Нульова» енергія залежить від концентрації вільних електронів і ефективної маси щільності станів електронів. Виникаючи в процесі різання металів пластичні деформації збільшують щільність дислокацій на чотири порядки, при цьому змінюється величина ефективної маси щільності станів електронів, що і дозволяє деяким електронам набути енергію достатню для подолання потенційного бар'єру і вийти на межу розділу між інструментом і деталлю. Описаний процес – це процес електризації, що відбувається при різанні.

Електрорушійну силу різання можна виразити за допомогою наступної формули:

$$E = U \frac{S_r}{St} e^{-\frac{d}{V\tau_0}} \quad (4)$$

де U – контактна різниця потенціалів, В; d – середній діаметр зони контакту інструменту з деталлю, мм; τ_0 – постійна стружкоутворення, с.

Найбільш потужне джерело електрики локалізовано на задній поверхні інструменту, тому що електрична провідність на задній поверхні вище в порівнянні з провідністю на передній поверхні. Тому електрична напруга, що фіксу-

ється вимірювальним приладом, являє собою в основному електричну напругу, що виникає на задній поверхні різального інструменту при різанні. Дослідження [11] показують, що на задній поверхні інструменту присутній пружно-пластичний контакт, що виникає в результаті хвилі пружного відновлення. Фактична площа контакту для пружнопластичного виду контакту виражається залежністю:

$$S_r = \frac{N}{C_2 \sigma_m} + v \cdot (6\sigma)^{\frac{1}{v}} \cdot N^{\frac{v-1}{v}} \cdot \sigma_m^{\frac{v-1}{v}} \cdot I^2 \cdot h_3^{\frac{1}{v}} \left(\frac{t}{\sin \varphi} + r \cdot \tan \frac{\varphi}{2} + S \right) \quad (5)$$

Приймаючи форму контакту інструменту з деталлю у вигляді сфери, отримуємо $C_1 \approx 3$. Враховуючи, що:

$$\frac{d}{V} = \frac{1}{f} \quad (6)$$

де f – частота контакту мікроступів інструмента з деталлю. Підставляючи S із (6), можна виразити величину зносу різального інструменту по задній поверхні:

$$h_3 = \frac{N \left(\frac{E}{U} \cdot \frac{St}{N} e^{-\frac{1}{f\tau_0}} - \frac{1}{\sigma_m} \right)^v}{k_1^v \left(\frac{t}{\sin \varphi} + r \cdot \tan \frac{\varphi}{2} + S \right) \sigma_m^{v+1} \cdot I^{2v}} \quad (7)$$

Змінна складова ЕРС різання характеризує коливання енергії на контактних поверхнях різального інструменту та деталі. Величина і характер зміни змінної складової електрорушійної сили різання залежать від тих всіх факторів, які впливають на величину зносу різального інструменту. До таких факторів відносяться: фізико-механічні властивості інструменту та деталі, а також їх неоднорідність; тиск; фактична площа торкання; швидкість відносного руху; вібрації; стан контактуючих поверхонь; процеси схоплювання та руйнування тощо [12].

Пристрій для вимірювання змінної складової електрорушійної сили різання можна подати у такому вигляді (Рис. 1). Магнітний тороїдальний феритовий сердечник 1 встановлюють на ізоляційні прокладки 2 на державку 3 різального інструменту. Котушка обмотки 4 встановлена на іншому кінці магнітного сердечника 1. Змінна складова електрорушійної сили E , що виникає в процесі різання, викликає протікання в обробній системі змінного струму, при цьому обробну систему можна представити у вигляді одного витка

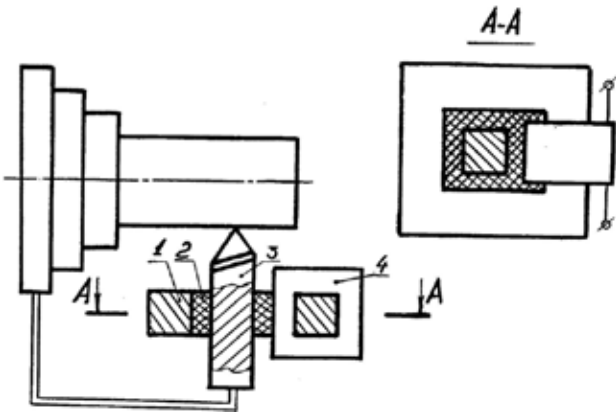


Рис. 1. Пристрій для вимірювання змінної складової електрорушійної сили. 1 – феритовий сердечник, 2 – ізоляційні прокладки, 3 – державка різального інструменту, 4 – обмотка

первинної обмотки. Перемінний струм, що протікає по різальному інструменті 3 наводить змінний магнітний потік Φ в сердечнику 1. При вимірюванні використовуємо режим холостого ходу трансформатора струму. У цьому режимі магнітний потік Φ збільшується внаслідок відсутності струмів розмагнічування, що у свою чергу різко збільшує електрорушійної сили E_ϕ у вторинній обмотці.

Магніторушійна сила в первинній обмотці виявляється у вигляді:

$$F_M = I_1 W_1 \quad (8)$$

де I_1 – струм, що тече по різальному інструменту, W_1 – число витків в первинній обмотці ($W_1 = 1$).

Магнітний опір сердечника R_M визначають за формулою:

$$R_M = \frac{l_M}{\mu' \cdot S_M} \quad (9)$$

де l_M – довжина ділянки магнітного ланцюга; S_M – площа перетину магнітопроводу; μ' – магнітна проникність матеріалу сердечника.

Магнітний потік Φ_M в сердечнику рівний

$$\Phi_M = \frac{F_M}{R_M} = \frac{I_1 \cdot W_1 \cdot S_M \cdot \mu'}{l_M} \quad (10)$$

ЕРС, що виникає у вторинній обмотці:

$$E_\phi = \frac{d\Phi_M}{d\tau} W_2 \quad (11)$$

де W_2 – число витків у вторинній обмотці. Підставляючи (8), (9), (10) в (11) отримуємо:

$$E_\phi = 2\pi \cdot W_2 \cdot \mu' \cdot f_M \cdot \frac{S_M}{l_M} \cdot I_1 \quad (12)$$

Аналіз (12) показує, що електрорушійна сила E_ϕ , що виникає у вторинній обмотці залежить, з одного боку, від конструктивних параметрів сердечника та числа витків вторинної обмотки, а з іншого боку від сили струму, що протікає по різці, та частоти зміни магнітного потоку. Величина частоти зміни магнітного потоку пропорційна частоті зміни струму і відповідно електрорушійної сили різання. Отже, вимірювання у вторинній обмотці дозволить виміряти змінну складову електрорушійної сили [6].

Автоматизована система контролю процесу обробки деталей складається з пристрою 1 (рис. 2) вимірювання змінної складової електрорушійної сили різання який підключений через підсилювач 2 електричних сигналів до датчика 3 дотику оброблюваної деталі, датчику 5 поломки і датчику зносу 6 різального інструменту. Перший вихід датчика 3 дотику, а також виходи датчика 5 поломки і 6 датчика зносу різального інструменту приєднані до блоку 7 управління приводом подачі металорізального верстата. Другий вихід датчика 3 дотику підключений до входу блоку 8 «кінець введення» пристрою числового програмного управління, який у свою чергу підключений до блоку управління 7 приводом подачі верстата.

Датчик поломки різального інструменту складається з логічної комірки, тригера і блоку управління пороговим значенням. Сигнал поломки формується при досягненні заданого рівня сигналу на пристрої 1. В даному випадку з виходу датчика надійде на вхід блоку 7 управління приводом подачі та блоку 8 «кінець введення» пристрою ЧПК коли рівень сигналу з виходу пристрою 1 зросте вдвічі протягом 0,04 с.

Датчик зносу різального інструменту складається з операційного підсилювача, підключе-

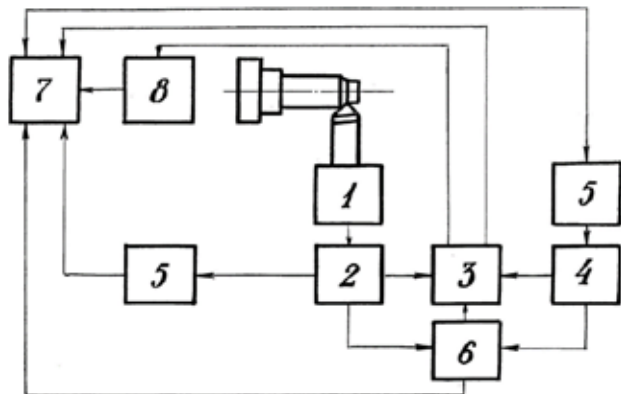


Рис. 2. Блок-схема автоматизованої системи контролю процесу обробки деталей на основі електричних сигналів

ного через діод і резистор до накопичувального конденсатора, компаратора і цифро-аналогового перетворювача. На виході датчика зношування формуються сигнали за умови досягнення різальним інструментом величини критичного зношування. У датчику зношування відбувається порівняння інтегрального рівня сигналу, накопиченого на конденсаторі за час одного проходу з рівнем сигналу, заданого на цифро-аналоговому перетворювачі і відповідного величини критичного зношування різального інструменту.

Робота системи контролю обробки деталей. При торканні різального інструменту з деталлю з виходу датчика з дотику подають сигнал на вхід блоку 7 управління приводом подачі верстата, де здійснюється автоматичне перемикавання подачі з прискореної робочої. У момент виходу різального інструменту з деталі відбувається автоматичне перемикавання з подачі на прискорену. Це дозволяє скоротити допоміжний час обробки деталей на верстатах з ЧПК.

На початку обробки система перевіряє наявність контакту пари «інструмент-деталь», якщо контакту не відбувається, то це свідчить про відсутність чи поломку інструменту, система аварійно завершує свою роботу.

Після реєстрації дотику система проводить вимірювання зносу різального інструменту. При досягненні інструментом критичного зносу система, для попередження браку, аварійно завершує свою роботу. У випадку коли знос інструменту знаходиться в межах норми відбувається поправка на

рівень зносу інструменту, що дозволяє підвищити точність обробки [13]. Далі програма перевіряє чи є процес обробки закінченим, якщо ні – система проводить повторну діагностику з певною періодичністю.

Висновки.

1. На основі теоретичних досліджень фізики процесу обробки деталей встановлений взаємозв'язок між видами зносу та електричними сигналами, які виникають в процесі обробки, а також основні причини виникнення електричних сигналів.

2. У роботі проведено критичний аналіз різних методів контролю зносу інструменту та їх ефективності в умовах виробництва. В результаті був обраний метод на основі електрорушійної сили, як найефективніший.

3. Розроблена математична модель, що заснована на вимірюванні змінної складової електрорушійної сили, що дозволяє оцінювати рівень розмірного зносу різального інструменту в процесі обробки.

4. Розроблений новий метод вимірювання змінної складової вимірювання електрорушійної сили без конструктивних змін верстата та без електричної ізоляції інструмента та деталі.

5. Розроблена автоматизована система контролю процесу обробки деталей на основі електричних сигналів, що дозволить підвищити точність обробки деталей та зменшити кількість бракованих деталей, що дасть можливість підвищити продуктивність та знизити собівартість виробництва.

Список літератури:

1. Остаф'єв В.О., Тимчик Г.С., Шевченко В.В. Адаптивна система управління. Механізація і автоматизація управління. Київ, 1983. С. 18-20.
2. Проць Я.І. Автоматизація виробничих процесів. Навчальний посібник для технічних спеціальностей вищих навчальних закладів. /Я.І. Проць, В.Б. Савків, О.К. Шкодзінський, О.Л. Лящук – Тернопіль: ТНТУ ім. І. Пулюя, 2011. 344 с.
3. Мазур М., Внуков Ю., Добровський В., Залого В. (2010). Основи теорії різальних матеріалів: підручник. Львів: Новий Світ-2000. ISBN 978-966-418-105-8.
4. Sharma V. S., Sharma S. K., Sharma A. K. Cutting tool wear estimation for turning // Journal of Intelligent Manufacturing. 2007. Vol. 19. P. 99-108.e
5. V. Tsapenko, M. Tereshchenko, G. Tymchik, S. Matvienko, V. Shevchenko. Analysis of Dynamic Load on Human Foot.// 2020 IEEE 40th International Conference on Electronics and Nanotechnology (ELNANO), Kyiv, Ukraine, 2020, pp. 400-404, doi: 10.1109/ELNANO50318.2020.9088788.
6. Шевченко В.В., Капінос І.В., Грабовський Д.О. Система контролю процесу обробки деталей в умовах «безлюдної технології» / В.В. Шевченко, І.В. Капінос, Д.О. Грабовський // Прогресивні технології та прилади. м. Луцьк. 2011. № 1. С. 223-231.
7. Шевченко В.В., Олінійчук А.І., Засць С.С. Аналіз акустичної емісії в процесах механічної обробки з використанням вейвлет-пакетів. // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Новое в современных технологиях. ISSN 2079-5459. – Харків: Вид-во НТУ «ХПІ», 2017. № 7 (1229). С. 233-238.
8. Manufacturing automation: metal cutting mechanics, machine tool vibrations and CNC design (2nd ed.) Cambridge. 2012. 382 p.

9. Matvienko S., Shevchenko V., Tereshchenko M., Kravchenko A., Ivanenko R. (2020). Determination of composition based on thermal conductivity by thermistor direct heating method. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. 19-29. DOI: 10.15587/1729-4061.2020.193429.
10. Stephenson D. A., Agapiou J. S. Metal Cutting Theory and Practice. 3-тє вид. Missouri : CRC Press, 2021. 976 с. ISBN-13[†]: †978-1466587533
11. Bello D. J., Leckie F. A. Strength and Stiffness of Engineering Systems. Boston, MA : Springer US, 2009. URL: <https://doi.org/10.1007/978-0-387-49474-6> (дата звернення: 12.02.2024).
12. Groche P., Nitzsche G. Influence of temperature on the initiation of adhesive wear with respect to deep drawing of aluminum-alloys. Journal of Materials Processing Technology. 2007. Т. 191, № 1-3. С. 314–316. URL: <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2007.03.098> (дата звернення: 12.02.2024).
13. Шевченко В.В., Капінос І.В., Грабовський Д.О. Система діагностики різального інструменту при обробці деталей на верстатах з ЧПК / В.В. Шевченко, І.В. Капінос, Д.О. Грабовський // Проблеми легкої і текстильної промисловості України. Херсон, 2011. № 1. С. 203-206.

Pylypenko V.O., Shevchenko V.V., Humeniuk T.S. AUTOMATED SYSTEM FOR CONTROL OF THE MACHINING PROCESS BASED ON ELECTRICAL SIGNALS

The work justifies the relevance of creating an automated system for controlling the machining process in flexible manufacturing systems. The implementation of an automated system in production will increase the accuracy of parts machining and reduce the number of defective parts, thus increasing productivity and reducing production costs. A critical analysis of machining process control systems has been conducted, showing that the most effective method is control based on measuring electrical signals, particularly the variable component of electromotive force. The studies have shown that the magnitude and nature of the variable component of electromotive force depend on the physico-mechanical properties of the tool and workpiece materials, the actual contact area, as well as friction and wear processes. Based on the theoretical research, a correlation between electrical signals, particularly the constant and variable components of electromotive force, and the level of tool wear has been established. The main causes of generating electrical signals have been identified, including exoelectronic emission associated with plastic deformation. A new method for measuring the variable component of electromotive force without structural changes to the machine tool or electrical insulation of the tool and workpiece has been proposed. A mathematical model of tool wear based on measuring the variable component of electromotive force has been developed. A block diagram of the automated system for controlling the machining process based on electrical signals has been developed. Key elements and the operation principle of the system have been considered. A device for measuring the variable component of electromotive force has been proposed. A system for controlling the machining process on CNC machines in flexible manufacturing systems has been developed, allowing for the detection of critical tool wear and breakage, as well as performing dimensional adjustments directly on the machine tool.

Key words: processing control, automated manufacturing, flexible production systems, cutting tool wear, electrical signals, variable component of electromotive force, tool breakage.

Рувінська В.М.

Національний університет «Одеська політехніка»

Тройніна А.С.

Національний університет «Одеська політехніка»

ІНФОРМАЦІЙНА ТЕХНОЛОГІЯ (МЕТОДИКА) РОЗРОБКИ НАВЧАЛЬНИХ КОМБІНАТОРНИХ ІГОР: ПРОДОВЖЕННЯ

У наш час розроблені програмні системи лише для найбільш популярних і складних комбінаторних ігор, таких як шахи, шашки, тощо. Запропоновано створювати такого роду системи і для простих неупереджених ігор, зокрема “НІМ”, “НІМ з обмеженнями” і “Дати”, що дозволяють користувачам не тільки грати, а також вивчати теорію комбінаторних ігор. Основною метою роботи є скорочення часу на створення навчальних комбінаторних ігор, для цього створена методика (ІТ) їх розробки, що має чотири етапи, такі як аналіз вимог, проектування, реалізація і тестування, як і для будь-якої програмної системи, але всі вони мають узагальнений характер, тобто підходять для розробки різних комбінаторних ігор. Ця стаття є другою в циклі із двох статей на цю тему, в першій були докладно описані початкові етапи технології, а в цій наведено останні кроки, тобто загальна MDA-структура на етапі аналізу вимог; опис того, як необхідно виконувати кожний етап загальної методики при розробці конкретної навчальної комбінаторної гри; створення конкретних комбінаторних ігор, а також аналіз, чи значно запропонована технологія скоротила час на їх розробку. В результаті було реалізовано програмну систему з використанням створеної методики (ІТ): розроблено три прості комбінаторні гри: “НІМ”, “НІМ з обмеженнями”, “Дати”, що не тільки грають з користувачем, а й вчать грати оптимально, тобто допомагають визначити виграні та програшні стани гри, дають підказки, як правильно ходити, тощо. При реалізації ігор були використані Unity2D, NetBeans IDE для Java, git. Показано, що час створення кожної з ігор завдяки узагальненій методиці зменшився в середньому в два рази у порівнянні зі розробкою кожної окремо.

Ключові слова: методика розробки навчальних комбінаторних ігор, математична теорія комбінаторних ігор, “НІМ”, “НІМ з обмеженнями”, “Дати”.

Постановка проблеми. Створення ігор – складний процес, достатньо трудомісткий і потребує залучення висококваліфікованих розробників. Якщо мова йде про створення навчальної гри, то штат розробників необхідно доповнити спеціалістами в області освіти, а також спеціалістами в предметній області. До навчальних ігор повинні застосовуватися такі критерії якості, як і до інших комп’ютерних ігор: захоплюючий геймплей, привабливість ігрового світу, сюжет та стиль гри, високий рівень видимого та звукового оформлення, зручність взаємодії з гравцем. Недооцінка цих якостей при створенні гри може призвести до повної втрати мотиваційного ефекту, що веде за собою зниження ефективності гри як навчального інструменту.

Існують програмні системи, які дозволяють користувачам грати в комбінаторні ігри та вдосконалювати свої навички, але насамперед для найбільш популярних, таких, як, наприклад, як шашки та шахи. Тому актуальним напрямком

є створення систем, що навчають і іншим, зокрема, простим комбінаторним іграм на прикладі ігор “НІМ” і “Дати”. Для цього необхідно запропонувати загальні підходи до створення комбінаторних ігор, а саме, провести аналіз вимог до комбінаторної гри, використовуючи такі документи, як дизайн-документ гри та MDA-структуру. І далі на цій основі провести проектування, реалізацію та тестування запропонованих рішень.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. *Історія розвитку комбінаторної теорії ігор.* Існують чотири основні посилання на матеріали щодо комбінаторних ігор. Одна з них – це дослідницька книга «On Numbers and Games» [1, с. 3-8], Дж. Конвей, видана в Лондоні в 1976 р. і перевидана потім в 1979 р., а потім і в 2000 р. Ця книга містить багато основних положень за цією тематикою і призвела до швидкого розвитку цього напрямку, який триває й донині. Ще одна книга – двотомне видання «Winning ways for your mathematical plays» [2, с. 14-15], написана

Берлекемпом, Конвеем і Гаєм у 1982 р. і перевидана в 2001 р. У книзі описано багато цікавих ігор, більша частина з яких доступна студентам-бакалаврам математичного спрямування. Найпростіше введення в рівноправні комбінаторні ігри представлено в книзі Richard K. Guy «Fair Game» (у перекладі, «Чесна гра») [3] опублікована в 1989 році. Сучасна книга з комбінаторної теорії ігор «Thomas S. Ferguson. Game Theory» [4, с. I-3 – I-5], видана у 2014 році. З наведених вище прикладів можна зробити висновок, що розвиток теорії комбінаторних ігор не стоїть на місці.

Критичний огляд навчальних комбінаторних комп'ютерних ігор. Існують ігри [5, 6], що навчають користувача грати в шахи з нуля або допомагають покращити наявні навички гри завдяки різним рівням складності. Вони надають користувачеві можливість грати в шахи проти комп'ютера зі зростаючим рівнем складності. Також наявний шаховий наставник, що слідкує за ходами користувача та робить підказки. Є шашкова програма [7], що об'єднує в собі можливості гри і роботи з шашковими базами партій. Комп'ютерна програма Go [8] надає можливість зіграти партію з попередньо заданими параметрами, включає більше 2000 задач, різних по складності. Програма для гри у реверсі [9] ведеться на заданій користувачем складності: від новачка до професіонала.

Описані аналоги застосовані по-перше, лише для популярних ігор; по-друге, користувачам із-за складності кожної з цих ігор не надається можливість вивчати загальні основи теорії комбінаторних ігор; і третє, оскільки ігри, що розглядаються, відносяться до одного класу, то і можна узагальнено проводити їх розробку вже починаючи з етапу визначення вимог до програмної системи.

В роботі описані створені програмні системи для навчання комбінаторній теорії ігор, а також узагальненні способи їх проектування на прикладі простих комбінаторних ігор, таких як “НІМ”, “НІМ з обмеженнями”, “Дати”.

Постановка завдання. Метою дослідження є розробка методики зі скорочення часу на побудову комп'ютерних навчальних комбінаторних ігор на базі узагальненої інформаційної технології їх розробки, що запропонована в роботі.

Виклад основного матеріалу. В [10] наведено інформаційну технологію для створення різноманітних комбінаторних ігор, а також деталізовано основні, зокрема, початкові етапи. Далі розглянемо докладно інші етапи, що не були детально описані раніше, а саме: дизайн-документ для кон-

кретної комбінаторної гри, узагальнену MDA-структуру для комбінаторної гри, проектування сховища даних, етапи реалізації та тестування (нижченаведена нумерація відповідає номерам методики [10]).

Скорочений дизайн-документ для гри «НІМ з обмеженнями». Створюється на базі узагальненого дизайн-документу для комбінаторних ігор [10]. “НІМ з обмеженнями” – гра, в якій два гравці по черзі беруть предмети із купки. За один хід з купки можна взяти тільки стільки об'єктів, скільки задано в параметрах гри. Програє гравець, який не може зробити хід.

Кожна купка представляється на екрані у вигляді одного рядка предметів. Діями гравця є вибір купки та обрання кількості предметів, які треба з неї взяти (тобто видалити), та передача ходу іншому гравцеві. Його мета – це перемога у грі, досягти якої можна залишивши після свого ходу таку позицію, в якій другий гравець програє. Перешкодою у грі є наявність другого гравця, мета якого збігається з метою першого. Ігрова механіка передбачає взаємодію гравця з ігровими об'єктами, змінюючи стан гри. Система генерує об'єкти на полі (купки) і заповнює їх предметами. Купки заповнюються предметами у відповідності до обраних параметрів. При спробі обрання іншої кількості предметів, що не збігається із заданою в параметрах гри, система повинна попередити користувача та вивести доступні йому ходи.

Набір ігрових предметів та елементів інтерфейсу зображений на рис. 1, в якому присутні кнопки для відкриття вікна, паузи та передачі ходу іншому гравцеві. Предмети, що може обрати користувач, можуть знаходитись у двох станах: активний – об'єкт буде вважатися обраним та змінювати своє положення один раз у декілька кадрів після кліку по ньому; звичайний – об'єкт зберігає статичне положення на полі, оскільки не був обраним гравцем. Для завершення ходу гравцеві необхідно натиснути кнопку передачі ходу. Також йому доступні елементи для переходу між сценами.

Mechanics-Dynamics-Aesthetics (MDA) структура. В ігровому дизайні структура MDA – це інструмент, який використовується для аналізу та формалізує використання ігор, розбиваючи їх на три компоненти [11, с. 1-4]. MDA-структура уточнює терміни «ігровий процес» (gameplay) і «забава» (fun), використовує їх визначення для демонстрації стимулюючих і дестимулюючих властивостей різної динаміки за різними типами естетичного використання гри. З точки зору



Рис. 1. Набір ігрових об'єктів гри «НІМ з обмеженнями»

дизайнера, механіка створює динаміку, яка, в свою чергу, генерує естетику. Такий напрям зв'язку часто створює проблему для дизайнера ігор, тому що він здатний впливати тільки на механіку, і тільки через неї можна отримати значущу динаміку і естетику для гравця. Але гравець бачить гру через роботу трьох компонент: правила, система, «забава», тому для гравця використовується зворотній напрям зв'язку: він відчуває гру через естетику, що надається ігровою динамікою, яка з'являється з механіки.

Компонент «Естетика» визначає емоційні реакції, «забаву» для гравця. Існують вісім видів естетики: відчуття (Sensation), фентезі (Fantasy), розповідь (Narrative), виклик (Challenge), братерство (Fellowship), дослідження (Discovery), вираз (Expression), підпорядкування (Submission). Навчальні комбінаторні ігри для гравця – це перешкода, що закликає його щось подолати, освоїти, підвищуючи при цьому ймовірність повторного використання гри. Такі ігри мають свій рівень «забави», що формується такими видами естетики як: «відчуття» – гравець, що не грав у такий тип ігор, відчуває щось зовсім незнайоме; «виклик» – гра закликає освоїти математичну теорію ігор, інакше ти не зможеш виграти; «підпорядкування» – гра як проведення часу.

Компонент «Механіка» включає: game-правила, тобто правила, цілі, що визначають мету гри; play-правила, тобто правила маніпуляції, що визначають основні дії, які гравець може застосувати в грі; мета-правила, що визначають способи налаштування або зміни гри, а також алгоритми і структури даних в ігровому рушії [12, с. 2-4]. Для комбінаторних ігор game-правила співпадають з класичними правилами для цих ігор. В якості play-правил можна виділити такі дії, як *множинний вибір об'єктів*, використовуючи будь-який

пристрій введення, тобто комп'ютерну миш або Touchpad та установлення або утримання декілька об'єктів в певному стані; *запис*, тобто, введення символічних значень з клавіатури; *погодження*, коли гравець повинен встановити програшну позицію для суперника. До мета-правил відноситься *рандом*, тобто створення кожного разу нової гри; способи налаштування складності гри та інше.

Компонент «Динаміка» створюється в процесі гри як результат, який є часто непередбаченим в процесі початкової розробки поведінки компонента «Механіка», викликаних: діями гравця, які залежать від його психо-фізіологічних здібностей, а також результатами взаємодії різних механік між собою. Динаміка для комбінаторних ігор досягається за рахунок підвищення складності гри у процесі навчання. Вид Естетики «виклик» створюється такими динамічними характеристиками як вплив часу і гра суперника, яку є бажання перевершити, а також результат взаємодії механік «вибір», «запис» та «погодження». В табл. 1 зведено результати MDA-аналізу.

Проектування сховища даних для збереження результатів проведених ігор, які можуть бути використані під час аналізу успішності навчання. На рис. 2 представлена концептуальна модель даних у випадку, якщо застосовуються БД. Атрибутами сутності для «Користувач» є логін та пароль для входу у власний профіль. Користувач отримує дані з сутності «Результати гри G» у вигляді статистики, де G – розроблювана комбінаторна гра. Атрибутами цієї сутності виступає перелік характеристик з наступних характеристик: результат (перемога чи поразка), складність гри та час партії. Замість використання сервера та бази даних розробник може зберігати дані про проведені ігри у локальному сховищі, наприклад, використати файл XML (рис. 3).

Результати аналізу гри за допомогою MDA-структури

MDA-компонент	Що включає для комбінаторних ігор
Естетика	«виклик» (Challenge) «відчуття» (Sensation) «підпорядкування» (Submission)
Механіка	«вибір» (Select) «запис» (Write) «рандом» (Random) «погодження»(Match)
Динаміка	Вплив часу, гра противника та динаміка, що утворюється у результаті взаємодії механік «вибір», «запис» та «погодження» під впливом психо-фізіологічних здібностей користувача.

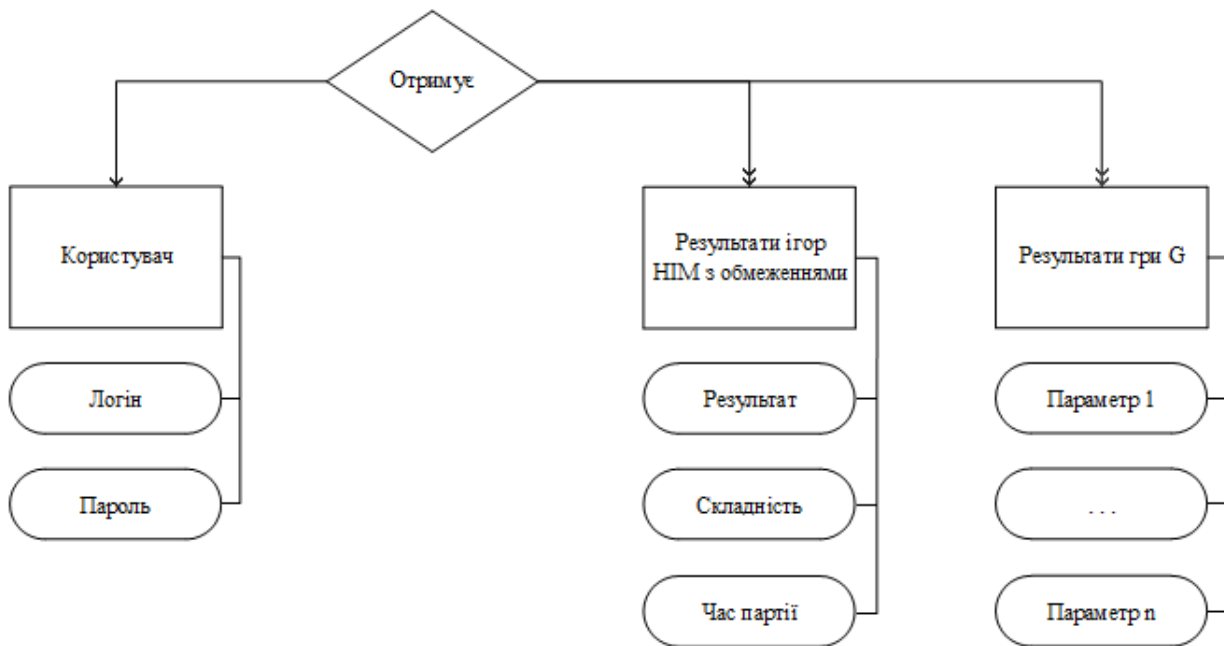


Рис. 2. Концептуальна модель даних

Проектування конкретних комбінаторних ігор згідно з узагальненою інформаційною технологією для створення комбінаторних ігор [10]. В результаті повинні бути розроблені необхідні для неї алгоритми (рис. 4).

Користувач обирає параметри гри, а саме: власника першого ходу; кількість купок; значення, що вказують на кількість предметів, яку можна взяти за один хід. Далі система генерує та зберігає позицію гри, а також виводить її гравцеві. Починається цикл гри. За один прохід циклу гравець повинен зробити хід та передати хід іншому гравцеві, а система обчислить змінений стан гри. У разі, якщо гравець залишає після свого ходу кінцеву позицію, то гра завершується, і система виводить інформаційне вікно з переможцем партії.

Далі наводиться детальна структура БД; архітектура, згідно узагальненій діаграмі компонентів

Структура XML-файлу для збереження даних:

```

<results>
  <game>
    <gameName>game_name</gameName>
    <gamePart>
      <parameter1>value1</parameter1>
      <parameter2>value2</parameter2>
      <parameterN>valueN</parameterN>
    </gamePart>
    <gamePart>...</gamePart>
  </game>
</results>
    
```

Рис. 3. XML для локального сховища



Рис. 4. Алгоритм гри «НІМ з обмеженнями»

тів з додаванням до неї необхідних додаткових класів, полів та методів, властивих цій грі; також детальні макети інтерфейсу користувача.

Реалізація. На цьому етапі створюється весь контент для гри. Реалізуються усі функції, що були визначені на етапі аналізу вимог та проектування. Розробка основного наповнення гри передбачає створення графічних ресурсів та реалізацію зазначених алгоритмів гри.

Для створення графіки пропонується використовувати Photoshop або Gimp, для моделювання та анімації Maya або Blender. Для полегшення розробки гри слід використати ігровий движок, що являє собою центральну програмну частину відеогри, яка відповідає за всю її технічну сторону, систематизує її внутрішню структуру. Це може бути Unity3D, Unreal Engine, Construct.

Методика (IT) була апробована в розробці ігор за допомогою Unity3D, оскільки даний ігровий движок надає функціональні можливості, які дозволяють їх використання в різних іграх. В Unity присутня візуальна розробка, а також підтримка багатьох платформ. Також Unity дозволяє використання необхідного розробникові способу контролю версій. Програмна складова реалізується за допомогою скриптів, їх написання вико-

нується з використанням мови програмування C# або JavaScript [13, с. 235-252]. Редагування коду відбувається з використанням зовнішнього інтегрованого середовища розробки Visual Studio або MonoDevelop.

Якщо під час етапу проектування було прийнято рішення про розробку сервера, то він повинен підтримувати багатопотоковість та формувати запити до БД відповідно до запитів клієнта, для цих цілей підійде ряд наступних технологій: MySQL – вільна СУБД для реляційних БД; HeidiSQL – вільний відкритий клієнт для управління БД, підтримує з'єднання та роботу з MySQL; NetBeans IDE – вільне інтегроване середовище розробки для Java, що підтримує рефакторинг, профілювання, виділення синтаксичних конструкцій, автодоповнення мовних конструкцій, шаблони коду та інше.

Тестування. Була розроблена система «Game of Strategy», що дозволяє користувачу грати в три комбінаторні гри: «НІМ», «НІМ з обмеженнями» та «Дати». Проведена перевірка розробленої системи на предмет відповідності вимогам, заявленим у узагальненому дизайн-документі та дизайн-документах розроблених ігор, а також в описі MDA-структури.

При вході в систему новий користувач проходить реєстрацію. В подальшому авторизується, вибирає гру та її параметри, а саме, хто робить перший хід, кількість купок, складність, для гри «НІМ з обмеженнями» ще задає, скільки предметів можна взяти із купки за хід.

Якщо вибрані «НІМ» або «НІМ з обмеженнями», то попадає в поле гри (рис. 5). Тут є п'ять купок, кожна з яких представлена рядком із рибок.

Під час гри користувачеві доступні перегляд попередніх ходів (для цього зліва видно, що вже були 4 ходи системи і гравця, і можна натиснути на ці піктограми та їх побачити), вікно паузи (в



Рис. 5. Сцена гри «НІМ» і «НІМ з обмеженнями»

правому верхньому куті), під час якої можна переглянути правила гри, а також для гри «НІМ» та «НІМ з обмеженнями» – блокнот для розрахунків. Для гри «НІМ з обмеженнями», коли користувач помилково намагається взяти кількість предметів, відмінну від встановленої, система видає підказку про доступні ходи.

Якщо вибрана гра «Дати», то вибираються початкова та кінцева дати. У цій грі змінюється лише ігрове поле, інші елементи інтерфейсу однакові для усіх ігор (рис. 6). Видно, що початкова дата – 10 жовтня, а кінцева дата – 16 жовтня. І під час навчання гравцю показують кольором виграшність позицій: жовтий колір – програшна, синій – виграшна. Дійсно, 16 жовтня – це програшна позиція для першого гравця, тому що він не може зробити хід, бо далі не можна ходити, так як це кінцева дата. 15 жовтня – теж програшна позиція для першого гравця: перший гравець почне ходити, і він може збільшити початкову дату тільки на 1 день, таким чином, він одержує 16 жовтня, тобто програш. А 14 жовтня – виграшна позиція для першого гравця, тому що гравець змінить число на 1, і таким чином другий гравець попаде на 15 жовтня, тобто в програшну позицію.



Рис. 6. Сцена гри «Дати»

По завершенню гри користувачеві пропонується повернутися до головного меню або зіграти ще раз з такими ж параметрами. Після повернення до головного меню користувач може змінити параметри, переглянути статистику своїх ігор, а також список найкращих гравців з їх досягненнями.

Висновки. Стаття є завершальною із циклу з двох статей, що присвячені узагальненій інформаційній технології створення навчальних комбінаторних ігор. Проведено докладний опис останніх етапів, що не були описані в першій статті, а саме, MDA-структура для формалізації можливостей використання комбінаторних ігор, проектування сховища даних для збереження результатів проведених ігор, рекомендації з реалізації комбінаторних ігор, дизайн-документ та схема алгоритму для гри «НІМ з обмеженнями», тестування. З використанням створеної ІТ (методики) було розроблено програмну систему, що дозволяє користувачеві вчитися теорії та грати в прості комбінаторні ігри «НІМ», «НІМ з обмеженнями» та «Дати», а також задати параметри гри, зберегти результати партій, поглянути статистику по партіям та кращих гравців.

Згідно з результатами проведеного експериментального випробування, застосування розробленої методики значно скоротило час на розробку ігор. У середньому витрати часу при розробці однієї гри скоротилися вдвічі. Розробка самої системи та однієї гри на основі методики займає 97 днів, тоді як розробка такої системи з однією грою, але без використання методики займає 110 днів. Час розробки зменшився на 12%. При додаванні гри до системи час розробки гри скорочується на 47%.

Напрями подальшого дослідження включають додавання до системи нових навчальних комбінаторних ігор та реалізацію режиму гри, в якому користувачі системи могли б грати один проти одного.

Список літератури:

1. John H., Peters A. K. Conway. On Numbers and Games. CRC Press; 2nd edition. – December 11, 2000 – pp. 242
2. Berlekamp E., Conway J., Guy R. Winning ways for your mathematical plays. 2nd edition. – ISBN 1-56881-130-6 (alk.paper) – 2001, – pp. 297
3. Richard Guy. Fair Game: How to Play Impartial Combinatorial Games. Exploration in Math Series – 1989 – pp. 113
4. Thomas S., Ferguson A. Course in Game Theory – 2020 – pp. 46
5. Lucas Chess. An easy way to play and train chess on your PC. URL: <https://lucaschess.pythonanywhere.com/> (дата звернення 24.09.2023).
6. Martin Blume. Arena Chess GUI. URL: <http://www.playwitharena.de/> (дата звернення 24.09.2023).
7. Alexander Svirin. Aurora Borealis Draughts professional – URL: <http://aurora.draughtsworld.com/> (дата звернення 24.09.2023).
8. SmartGo One. Learn, play, study Go. URL: <https://smartgo.com/> (дата звернення 24.09.2023).
9. Gunnar Andersson. Wzebra, Othello game. URL: <http://radagast.se/othello/> (дата звернення 24.09.2023).

10. Рувінська В.М., Тройніна а.с. Інформаційна технологія (методика) розробки навчальних комбінаторних ігор: перші кроки / Вчені записки Таврійського національного університету імені В.І. Вернадського. Серія: Технічні науки». Том 34 (73) № 6, 2023 – с. 140-146.

11. Hunicke R., Leblanc M., Zubek R. MDA: A Formal Approach to Game Design and Game / Proceedings of the AAAI-04 Workshop on Challenges – URL: <https://www.cs.northwestern.edu/~hunicke/MDA.pdf> (дата звернення 24.09.2023).

12. Djaouti D., Alvarez J., Jessel J.-P., Methel G., Molinier P. A Gameplay Definition through Videogame Classification. International Journal of Computer Games Technology – URL: <http://dx.doi.org/10.1155/2008/470350>. (дата звернення 24.09.2023).

13. Jeremy Gibson Bond. Introduction to Game Design, Prototyping, and Development: From Concept to Playable Game with Unity and C# 3rd- 2022 – pp. 907

Ruvinska V.M., Troynina A.S. INFORMATION TECHNOLOGY FOR THE DEVELOPMENT OF TRAINING COMBINATOR GAMES

Nowadays, software systems are developed only for the most popular and complex combinatorial games, such as chess, checkers, etc. It is proposed to create this kind of system for simple impartial games, in particular "NIM", "NIM with restrictions" and "Dates", which allow users not only to play, but also to study the theory of combinatorial games. The main goal of the work is to reduce the time for creating educational combinatorial games, for this a methodology (IT) for their development has been created, which has four stages, such as requirements analysis, design, implementation and testing, as for any software system, but all of them have a generalized character, that is, they are suitable for the development of various combinatorial games. This article is the second in a series of two articles on this topic, the first detailed the early stages of the technology, and this one provides the final steps, i.e. the general MDA structure for the requirements analysis stage; a description of how it is necessary to perform each stage of the general methodology when developing a specific educational combinatorial game; creating specific combinatorial games, as well as analyzing whether the proposed technology significantly reduced the time for their development. As a result, a software system was implemented using the created methodology (IT), three simple combinatorial games were developed: "NIM", "NIM with restrictions", "Dates", which not only play with the user, but also teach how to play optimally, that is, help to determine winning and losing game states, giving hints on how to make a play properly, etc. Unity2D, NetBeans IDE for Java, git were used in the implementation of the games. It is shown that the time to create each of the games, thanks to the generalized methodology, was reduced by an average of two times compared to the development of each one separately.

Key words: technology for development of educational combinatorial games, mathematical theory of combinatorial games, "NIM", "NIM with restrictions", "Dates".

Савіцький Р.С.

Державний університет «Житомирська політехніка»

Петрук О.О.

Державний університет «Житомирська політехніка»

РОЗРОБКА ПРОТОТИПУ ВЕБДОСТУПНОГО ІГРОВОГО СИМУЛЯТОРУ

Важливим завданням сучасного цифрового світу є створення доступних вебдодатків, зокрема вебдоступних ігрових симуляторів. Ігрові симулятори дозволяють навчати та зацікавлювати відвідувачів довше і якісніше. Водночас постає проблема з вебдоступністю в проєктах, так як навчання має бути необмеженим для маломобільних груп населення. Вебдоступний ігровий симулятор – це вебдодаток, який поєднує в собі елементи симуляції з гейміфікацією, тобто застосуванням ігрових методів. Симулятори використовують для різноманітних цілей, таких як навчання, тренування, вирішення проблем або розваги. Застосунок імітує сценарії або ситуації, що дають змогу користувачам отримати певний досвід чи навички, використовуючи інтерактивний та захоплюючий підхід. Ігрова симуляція, у свою чергу, полягає в застосуванні елементів гри, таких як бали, рівні, досягнення, конкурси тощо, для стимулювання участі та мотивації користувачів. Важливо зазначити, що симулятори повинні бути доступні для всіх користувачів, включаючи людей з обмеженими можливостями. Це означає, що симулятор повинен бути розроблений з урахуванням принципів вебдоступності, таких як використання альтернативного тексту для зображень, чітких і лаконічних заголовків і навігації, а також доступних форм і полів вводу. Вебдоступний ігровий симулятор може бути використаний у навчальних цілях, де студентам надається можливість взаємодіяти з віртуальними ситуаціями або завданнями, щоб отримати навички або знання. Було проаналізовано функціональні можливості симулятора та обґрунтовано основні підходи до його побудови. Спроєктовано вебдоступний ігровий симулятор, який дозволяє користувачеві навчатись та покращувати розуміння механік бою та стратегій розвитку персонажів.

У результаті було отримано діючий прототип вебдоступного ігрового симулятора, що демонструє основні принципи роботи застосунку. Основу системи становить сервер, який взаємодіє з користувачами в браузері. Програмне забезпечення для сервера створено за допомогою мови програмування Node.js, TypeScript і фреймворка Nest.js. Для створення клієнтського інтерфейсу було використано React, Next.js.

Ключові слова: вебдоступність, ігровий симулятор, механіка бою, стратегія розвитку.

Постановка проблеми. Вебдоступні ігрові симулятори (тут і надалі симулятори) стають все більш популярними завдяки здатності поєднувати зацікавлення та освітні цілі. Симулятори можуть використовуватися для навчання людей будь-якого віку та з різним досвідом у широкому спектрі тем, тому він має відповідати хоча б базовим вимогам з вебдоступності (WCAG) [1]. Ігрові симулятори дозволяють зберігати фокус на основному матеріалі, що є важливим для різних вікових груп.

До терміну ігрових симуляторів звертались низка вчених, зокрема Концедайло В. В. та Вакалюк Т. А., під ігровими симуляторами розуміють «інтерактивні програми, що повністю або частково моделюють певні реальні процеси або системи, які захоплюють та мотивують студентів за допомогою веселого й цікавого ігрового досвіду,

де студенти можуть виконувати різні ролі в різноманітних реалістичних обставинах та використовуються в освітньому процесі, коли реальна практика неможлива або недоступна» [2]. З цього визначення будемо виходити в поточному дослідженні.

Вебдоступні ігрові симулятори можуть бути цінним інструментом для онлайн-навчання. Симулятори допомагають користувачам краще засвоювати та запам'ятовувати інформацію щодо механік бою та стратегій розвитку персонажів, перетворюючи процес навчання на інтерактивну гру. Вебдоступні ігрові симулятори можуть відтворювати реальні ситуації в складних віртуальних середовищах, де користувач може експериментувати з механіками бою, вдосконалювати свої навички і вирішувати проблеми у безпечному

і контрольованому середовищі симулятора. Таке використання вебдоступних ігрових симуляторів забезпечує можливості навчання шляхом спроб і помилок, що може бути набагато ефективніше, ніж просте вивчення теорії.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. За останні роки спостерігається значне зростання кількості досліджень, присвячених вебдоступним ігровим симуляторам. Це пов'язано з зростанням популярності ігор в цілому, визнанням потенціалу вебдоступних ігрових симуляторів для: покращення навчання, підвищення мотивації та зацікавленості. Такі симулятори використовуються в широкому спектрі галузей, зокрема, освіта, охорона здоров'я, бізнес, навколишнє середовище тощо. За даними Google Scholar, станом на 11 березня 2024 року за запитом "гейміфіковані вебсимулятори" ("gamified web simulations") було знайдено 21 900 статей. За останні 5 років кількість статей по даній тематиці збільшилась на 150%, за останні 3 роки кількість статей збільшилась на 75%. У статтях, присвячених вебдоступним ігровим симуляторам, розглядається широкий спектр тем. Використанням гейміфікованих вебсимуляторів для покращення навчання в різних предметних областях, підвищення мотивації учнів займався Макаревич О. О. [3], вирішенням проблем застосування гейміфікації у навчальному процесі Лященко Т. О. [4], гейміфікацією як методом формування стійкої мотивації до занять фізичною культурою займалися Никифорова Л. А., Тітова Г. В. [5], особливостями викладання навчального матеріалу з елементами гейміфікації у вищих медичних закладах займалися Юрій Р. Ф., Краснова А. А., Тиравська Ю. В. [6], гейміфікацію ігрових механік для мотивації персоналу вивчала Сергеева Л. [7], гейміфікацією бізнес-процесів менеджменту персоналу досліджували Варіс І. О., Кравчук О. І., Зайцева П. О. [8], дослідження доступності в навчальних проєктах розглянуто в роботі [9].

Постановка завдання. Мета роботи полягає в розробці прототипу вебдоступного ігрового симулятора навчання основних механік бою та стратегій розвитку персонажів.

Виклад основного матеріалу. Вебдоступний ігровий симулятор – це вебдодаток, який поєднує в собі елементи гри та симуляції для досягнення певних цілей [10]. Він може бути використаний для навчання, тренування, розваги або сприяти вирішенню певних завдань. Головною метою вебдоступного ігрового симулятора є залучення користувачів і створення мотивації через вико-

ристання гейміфікації – включення ігрових елементів, таких як рахунок, рівні, досягнення та змагання, для стимулювання участі та досягнення результатів.

Симулятор може складатися з різних компонентів, залежно від конкретної мети та функціональності. Ось деякі з можливих складових [11]:

1. Інтерактивна ігрова оболонка, що містить інтерфейс, схожий на ігровий, з використанням графіки, анімації та звуків, щоб створити захоплюючу атмосферу.

2. Система досягнень та нагород, зокрема віртуальні медалі, значки або інші відзнаки, які користувачі можуть отримувати за досягнення цілей або завдань.

3. Прогресія та розвиток. Користувачі можуть починати з базового рівня та розвивати свої навички або досягати нових цілей, отримуючи додаткові можливості або рівні.

4. Соціальні функції, такі як можливість взаємодії та змагатися з іншими користувачами. Це може включати лідерські дошки, можливість обговорення та співпрацю.

5. Завдання та виклики, які користувачі повинні виконати, щоб просунутися вперед або отримати винагороду.

6. Можливості персоналізації. Користувачі можуть мати можливість налаштувати свої профілі, персонажів або інші аспекти гри відповідно до своїх вподобань.

7. Відстеження прогресу та аналітика.

8. Доступність для всіх користувачів. Додавання контрастних кольорів, можливість рухатись по сайту за допомогою клавіш, мультимовність.

Компоненти можуть бути комбіновані та адаптовані в залежності від конкретної мети та аудиторії використання вебдоступного ігрового симулятора.

Для створення інтерактивної оболонки для користувачів було вирішено обрати готовий всесвіт "Покемонів", який дуже популярний у світі, тому гарантовано що проєктом будуть цікавитись не тільки громадяни України, а ще й люди з усього світу, тому доцільно буде зробити мультимовність в проєкті. Для отримання основних даних про покемонів було вирішено обрати PokeAPI. PokeAPI – це безкоштовний вебAPI для отримання даних про Покемонів, що надає доступ до різноманітної інформації, включаючи їхні характеристики, типи, атаки, здібності, зображення тощо [12]. Це корисний ресурс для розробників вебсайтів, мобільних додатків або будь-яких інших проєктів, пов'язаних з Покемонами, які потребують доступу до даних про персонажів.

Для отримання винагород було вирішено реалізувати систему досягнень таких як, накопичення певної кількості покемонів, перемога в битвах тощо. Ці завдання поділяються на декілька етапів, від самого простого до самого складного. Для перегляду інших отриманих або не отриманих досягнень, користувач може перейти на окрему сторінку, де може переглядати всі доступні досягнення. Процент виконаних досягнень буде зараховуватись користувачеві, інші можуть переглядати процент досягнень, які є у користувача.

Для реалізації прогресу та розвитку була створена оффлайн арена, де користувач може перевіряти різні комбінації покемонів для отримання кращого бойового досвіду. Оффлайн арена підіймає зацікавленість до навчальної платформи, а також дозволяє працювати без обмеження інтернету, а отже прибирає один з можливих факторів доступності.

Соціальні функції були реалізовані у вигляді списку лідерів у вебсимуляторі. Кожен користувач може переглядати власну та сторонню статистику. Статистика включає наявність покемонів, історію битв, процент виконаних досягнень, а також зображення профілю. Користувач може зв'язатися з іншим користувачем по електронній пошті.

Для доступності було реалізована можливість проходити симулятор за допомогою лише одного з інструментів: клавіатури, комп'ютерної миші або тачпаду. Також була додана українська та англійська мови для різних типів користувачів, виконано контраст з кольорами, щоб кожен користувач мав змогу працювати з додатком без обмежень, зокрема це допоможе покращити якість роботи для людей з когнітивними обмеженнями.

Додаток складається з бекенд та фронтенд частини. Для реалізації клієнтської частини вебдоступного ігрового симулятора було використано

React.js [13], фреймворк для серверної обробки Next.js з використанням TypeScript [14].

Базуючись на вибраному стеку було спроектовано базову клієнт-серверну архітектуру з особливостями побудови вебдоступного ігрового симулятора. Саме поточний стек дозволив побудувати застосунок, яким можуть користуватись без обмежень велика кількість користувачів.

Симулятор складається з трьох незалежних сервісів, кожен з яких налічує 3–4 модулі. Загалом імплементовано 10 модулів. Кожен з модулів відповідає функціоналу на діаграмі прецедентів, а також реалізовує критерії доступності WCAG на рівні 2.1 (AA) (див. рис. 1). Цікавими модулями є модуль авторизації та аутентифікації. Новий користувач може зареєструватися у вебдоступний ігровий симулятор, і отримати випадкового покемона і 20 монет для подальшого розвитку.

Зареєстрованому користувачеві дається змога детальніше дізнатися про всесвіт покемонів, вивчаючи і вдосконалюючи його. Зареєстрований користувач може відвідувати симуляції онлайн арени, де ознайомитись з стратегіями розвитку персонажу (покращення за рахунок бою та тактик), користувач може змагатися проти інших користувачів, і отримувати нагороди за перемоги у битвах у вигляді рейтингу та монет. Якщо користувач не хоче втрачати рейтинг в арені, є можливість тренування навичок у оффлайн арені, де представленні покемони різних типів та здібностей. Симуляція тренування у оффлайн арені спрямована на покращення та розвиток механік бою. Існує система винагород у вигляді монет. Монети дозволяють покращувати властивості покемонів, або ж придбати нового в залежності від розвитку стратегічних цілей. Одним з варіантів використання є зілля, яке покращує характеристики на один матч. Також існує система винагород та

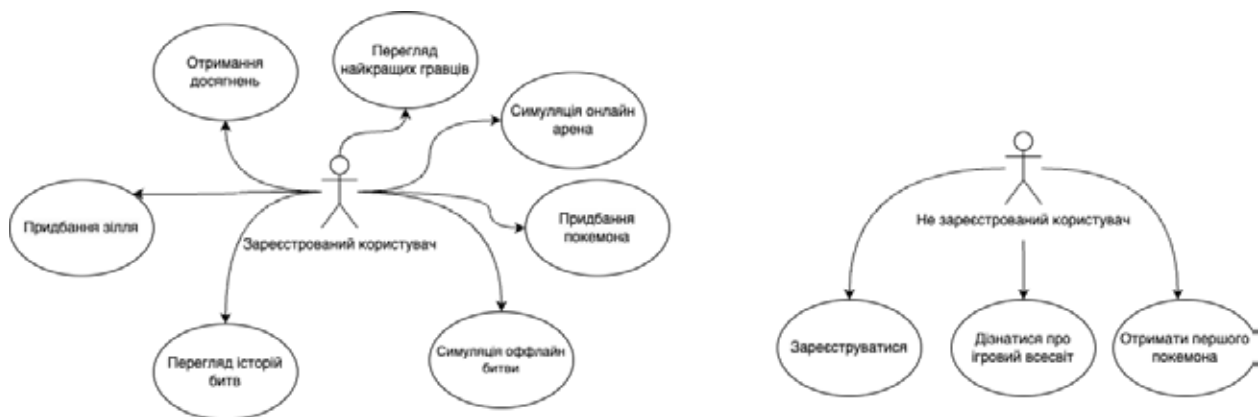


Рис. 1. Діаграма прецедентів

статистики, яка відображає різноманітну інформацію, зокрема, рейтинг покемонів, найкращих гравців, відсоток виграних битв тощо.

При більш детальному огляді інтерфейсу, що є важливим для визначення відповідності критеріям WCAG 2.1, варто звернути увагу на вхідний екран, де користувач має змогу побачити опис про весь світ симулятора, після чого отримує першого покемона. Навігація відбувається за допомогою клавіатури, що дозволяє великій групі маломобільних користувачів працювати з симулятором. А також система сфокусована на діях таким чином, щоб незрячі користувачі відчували сценарій і могли отримати всю інформацію за допомогою систем екранного читання.

Користувач може скористатись меню для навігації по вебдоступному ігровому симулятору. Першим елементом є посилання на контент, таким чином люди з обмеженими руховими активностями мають змогу розпочати працювати відразу з контентом, що відповідає правилам WCAG. Далі розміщений пошук, меню зі швидким доступом до всіх можливих функціональностей системи, кнопкою виходу. Основний контент – це список з горизонтальною навігацією, яка складається з назви, картинки, що містить альтернативний текст та пагінацію (див. рис. 2).

Користувач може керувати покемонами декількома варіантами. Зокрема, в бібліотеці шукати покемонів по імені, по номеру в пошуку, який завжди доступний у верхньому меню. Інший спосіб, це на сторінці покемона перейти за допомогою виділених окремих навігаційних елементів

(див. рис. 3). На сторінці покемона також вказаний тип покемона, ім'я, вага, ріст, статистика. Потрібно звернути увагу, що користувач може керувати фоном та іншими кольоровими елементами на сторінці. Зокрема, кожен покемон має власний колір. Базовий колір, що продемонстровано на рисунку 3 не є гарним варіантом (немає відповідності AA), тому буде надана рекомендація змінити його.

Важливим елементом симулятора є онлайн та офлайн арена. В онлайн арені користувачеві представленні противники, з якими він може почати битву. Перед битвою користувач може обрати зілля на битву (див. рис. 4).

Якщо користувач виграє, він отримує монети та рейтингові бали, противник, відповідно, втрачає рейтингові бали. Якщо користувач реєструється та отримує першого покемона, він автоматично потрапляє в арену. У користувача є змога отримати додаткові монети за наявності сильного покемону. Також вебдоступний ігровий симулятор дозволяє планувати різні стратегії бою та розвитку покемона.

В оффлайн арені (див. рис. 5) користувач може змагатися проти ботів, отримувати додаткові монети в битвах. Оффлайн арена повністю відповідає вимогам AA WCAG 2.1 для маломобільних користувачів, а також спрямована на покращення розуміння механік бою.

Також у кожного користувача є особистий профіль, де є змога отримати повну статистику, перелік покемонів, а також налаштування щодо доступності та навчання (див. рис. 6).

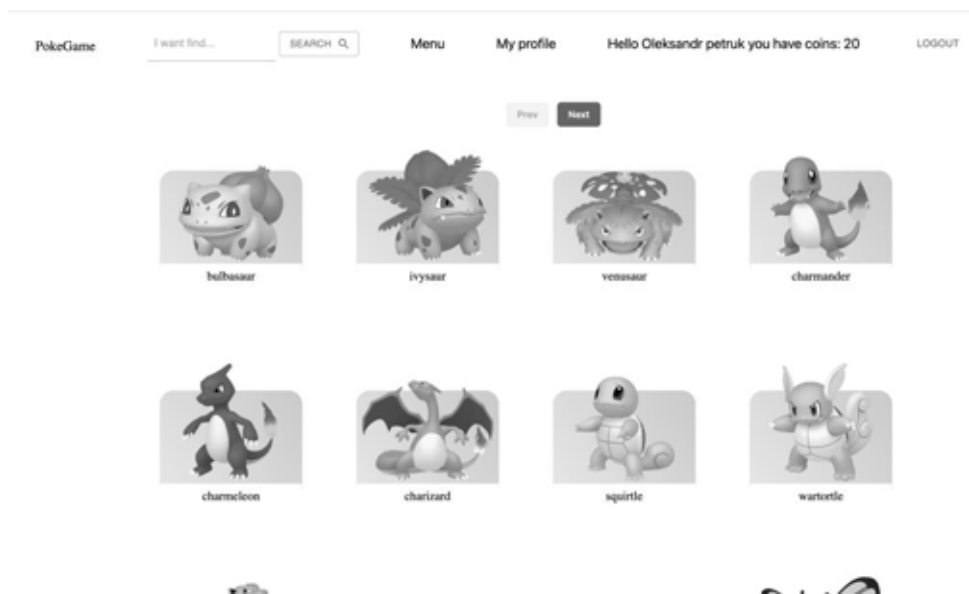


Рис. 2. Бібліотека покемонів та навігаційні елементи

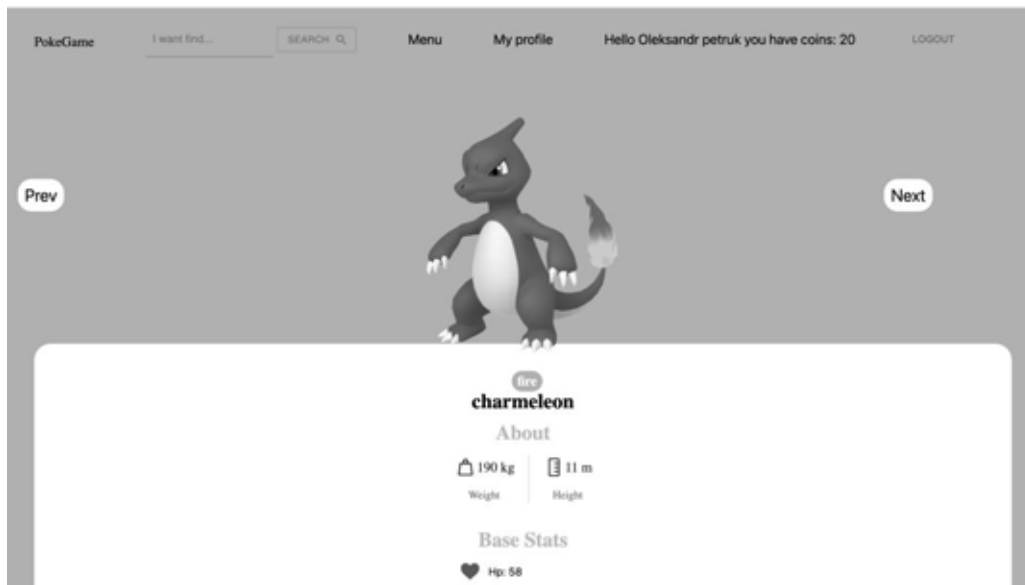


Рис. 3. Сторінка покемона з одним типом

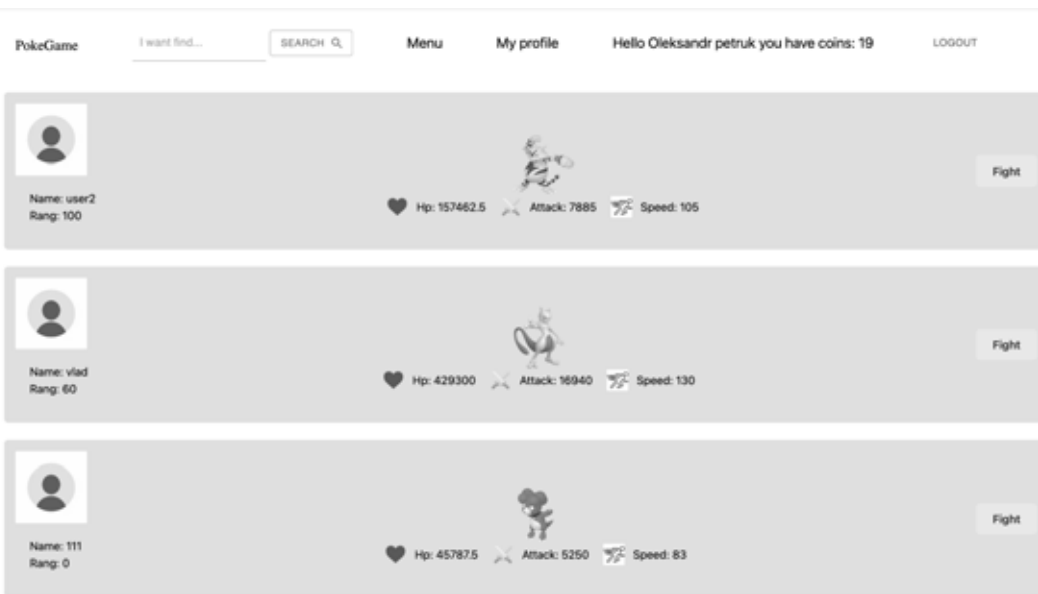


Рис. 4. Сторінка арени

Серед інших особливостей імплементації веб-доступності було створення декількох мов у симуляторі, контрастні кольори для людей з проблемним зором, оптимізація для людей з когнітивними обмеженнями, додана можливість проходити симулятор як на мобільних пристроях так і в комп'ютерах з можливістю навігації як мишою або клавіатурою.

Додатково було проведено експеримент, в якому проходили симуляцію студенти з обмеженими можливостями. Студентам вдалось покращити базового покемона та зрозуміти основи механік бою.

Висновки. У результаті було отримано прототип веб-доступного ігрового симулятора. Основу

системи становить сервер, який взаємодіє з користувачами симулятора, взаємодія клієнтів з сервером виконується за через REST API. Розроблений симулятор є дуже гнучким і доступним для всіх користувачів. Прототип симулятора навчає основним механікам бою, а також стратегіям розвитку персонажів.

До перспектив подальших досліджень відносимо експертну оцінку відповідності WCAG, яким має відповідати веб-доступний ігровий симулятор. Експертну оцінку варто провести на різних групах маломобільних користувачів, зокрема з когнітивними та навчальними відхиленнями.

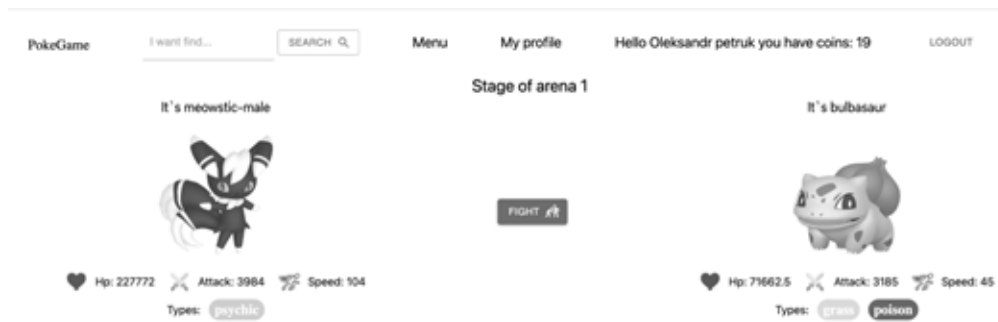


Рис. 5. Сторінка оффлайн арени

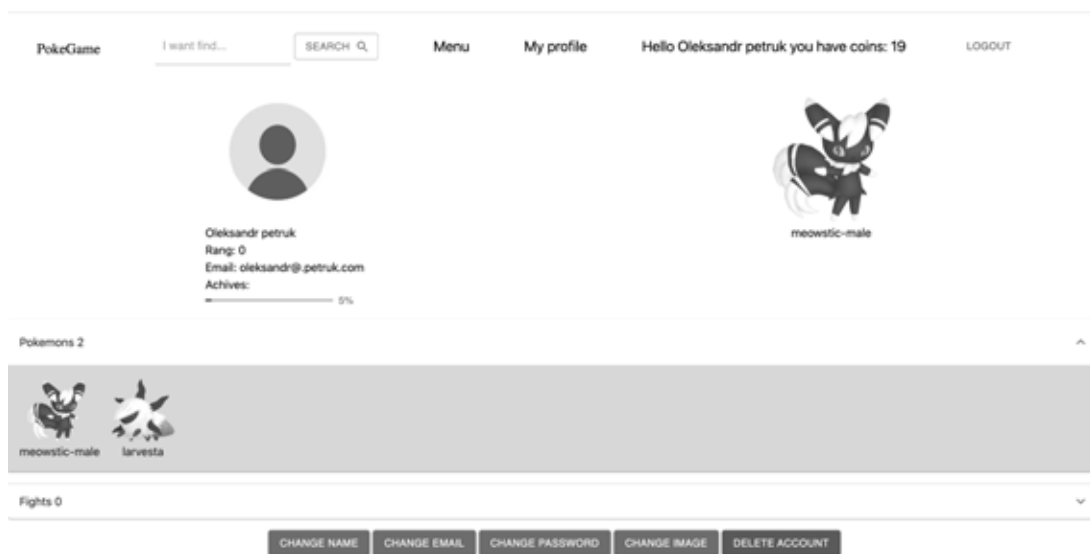


Рис. 6. Особиста сторінка користувача

Список літератури:

1. Настанови з вебдоступності (WCAG) 2.1. URL: <https://www.w3.org/TR/WCAG21/>.
2. Концедайло В. В., Вакалюк Т.А. Критерії добору ігрових симуляторів для формування професійних компетентностей майбутніх інженерів-програмістів. Інформаційні технології і засоби навчання. 2018. № 3 (65). С. 133-151. URL: <https://journal.iitta.gov.ua/index.php/itlt/article/view/2039/1347>
3. Макаревич О. О. Гейміфікація як невід’ємний чинник підвищення ефективності елементів дистанційного навчання. Молодий вчений. № 2(6). 2015. С. 279-282. Режим доступу: http://nbuv.gov.ua/UJRN/molv_2015_2%286%29_73
4. Лященко Т. О., Гришуніна М. В., Пічкур В. Р. Гейміфікація як одна з інноваційних форм навчального процесу. Управління розвитком складних систем. Вип. 35. 2018. С. 113–123. URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/Urss_2018_35_16
5. Никифорова (Прокоф’єва) Л. А., Тітова Г. В. Гейміфікація як метод формування стійкої мотивації до занять фізичною культурою. Сучасні методи та форми організації освітнього процесу у закладах вищої освіти. Одеса. 2022. С. 172-177. URL: <http://dspace.pdpu.edu.ua/bitstream/123456789/15334/1/Prokofieva%20L%202022.pdf>
6. Юрій Р. Ф., Краснова А. А., Тиравська Ю. В. Особливості викладання навчального матеріалу з елементами гейміфікації у вищих медичних закладах. Академічні візії. Вип. 16. 2023. DOI: <http://dx.doi.org/10.5281/zenodo.7639134>
7. Сергеева Л. Гейміфікація: ігрові механіки для мотивації персоналу. Теорія та методика управління освітою. 2014. № 2 (14). URL: <https://goo.gl/yANJjm>.
8. Варіс І. О., Кравчук О. І., Зайцева П. О. Гейміфікація бізнес-процесів менеджменту персоналу. Бізнес Інформ. № 4. 2023. С. 189-196. DOI: <https://doi.org/10.32983/2222-4459-2023-4-189-196>
9. Савіцький Р. С. Безбар’єрність вебпорталів освітніх навчальних закладів України. Технічна інженерія, Вип. 1 (91), 2023. 172–177. URL: [https://doi.org/10.26642/ten-2023-1\(91\)-172-177](https://doi.org/10.26642/ten-2023-1(91)-172-177)

10. Development of farm simulation application, an example for gamification in higher education. URL: <https://www.cabidigitallibrary.org/doi/full/10.5555/20173282262>
11. T. Auer and M. Felderer. Gamified Internet of Things Testing within a Virtual Learning Environment – towards the Interactive Simulation Game “IoTCityLab”. *2020 IEEE 32nd Conference on Software Engineering Education and Training (CSEE&T)*, Munich, Germany, 2020, pp. 1-4, doi: 10.1109/CSEET49119.2020.9206175.
12. PokeApi. URL: <https://pokeapi.co/>
13. React.js. URL: <https://react.dev/>
14. TypeScript. URL: <https://www.typescriptlang.org/>

Savitskyi R.S., Petruk O.O. THE WEB-ACCESSIBLE GAMING SIMULATOR PROTOTYPE DEVELOPMENT

An important task in the modern digital world is to create accessible web applications, including web-accessible gaming simulators. Gaming simulators enable longer and higher-quality engagement of visitors. However, there is a challenge with web accessibility in projects, as learning should be unrestricted for mobile populations.

A web-accessible gaming simulator is a web application that combines simulation elements with gamification, utilizing gaming methods. Simulators are used for various purposes such as education, training, problem-solving, or entertainment. The application simulates scenarios or situations that allow users to gain specific experiences or skills using an interactive and engaging approach. Gaming simulation, in turn, involves the use of game elements such as points, levels, achievements, contests, etc., to stimulate user participation and motivation. It is important to note that simulators should be accessible to all users, including people with disabilities. This means that the simulator must be developed considering web accessibility principles, such as using alternative text for images, clear and concise headings and navigation, as well as accessible forms and input fields. A web-accessible gaming simulator can be used for educational purposes, where students are given the opportunity to interact with virtual situations or tasks to acquire skills or knowledge.

The functional capabilities of simulators have been analyzed. The main approaches to its construction have been justified. A web-accessible gaming simulator has been designed to allow the user to learn and improve their understanding of combat mechanics and character development strategies.

As a result, a functional prototype of a web-accessible gaming simulator has been obtained, demonstrating the basic principles of the application's operation. The core of the system is a server that interacts with users in the browser. The server software was developed using the Node.js programming language, TypeScript, and the Nest.js framework. React and Next.js were used to create the client interface.

Key words: *web accessibility, gaming simulator, combat mechanics, development strategy.*

Слабінога М.О.

Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу

Пашковський Б.В.

Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу

Афанасьєв Б.О.

Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу

ПРОГРАМНА РЕАЛІЗАЦІЯ МЕХАНІЗМУ СИНХРОНІЗАЦІЇ ОБЛІКУ ТОВАРІВ ІНТЕРНЕТ-МАГАЗИНУ З ПОПУЛЯРНИМИ МАРКЕТПЛЕЙСАМИ

У статті розглядається проблема синхронізації обліку товарів інтернет-магазину з популярними маркетплейсами, яка є важливою для успішних онлайн-продажів. У сучасному електронному бізнесі синхронізація систем обліку товарів на складах з маркет-плейсами є ключовою стратегією для успішних онлайн-продажів. Маркет-плейси надають доступ до великої аудиторії покупців та інфраструктуру для зручного проведення бізнесу. Однак ведення обліку на різних платформах є трудомісткою задачею, тому автоматизована синхронізація баз даних стає важливим аспектом. Здійснено аналіз попередніх досліджень і публікацій з питань архітектурних рішень та алгоритмів синхронізації. У попередніх дослідженнях розглядалися архітектурні стилі та алгоритми синхронізації, проте більшість даних статей стосувалася великих маркетплейсів, не враховуючи локальну специфіку. Сформульовано мету роботи спрямовану на розробку веб-орієнтованої системи обліку товарів, включаючи механізм синхронізації з популярними маркетплейсами. Розроблено та реалізовано систему керування товарами інтернет-магазину з можливістю синхронізації з популярними маркетплейсами. Реалізована система використовує PHP та MariaDB і надає комплексну аналітику та інструменти для організації та управління категоріями та атрибутами товарів на складі. Це дозволяє підприємствам ефективно вести облік товарів та позицій та забезпечує гнучке управління асортиментом. Описано функціональні модулі системи, наведено їх призначення. Описано етапи синхронізації товарів та замовлень та подано детальний опис механізму синхронізації. Описано процес імпорту товарів, їх синхронізацію з маркетплейсами та експорт даних для оновлення залишків. Результатом роботи стало реалізація системи, яка підвищує якість роботи інтернет-магазинів та ефективно керує товарними потоками.

Ключові слова: маркетплейс, синхронізація, веб-орієнтована система, облік товарів, база даних.

Постановка проблеми. У сучасному бізнесі електронної комерції, синхронізація систем обліку товарів на складах з маркет-плейсами визначається як невід'ємна частина стратегії успішних онлайн-продажів. Розміщення товарів на маркетплейсах стає вагомим стратегією для підприємств, які прагнуть максимізувати свій потенціал та ефективно конкурувати на глобальному ринку.

Однією з ключових переваг є безперервний доступ до широкої аудиторії покупців, яка активно користується платформами маркет-плейсів. Маркетплейси забезпечують не тільки масштабне охоплення ринку, але і унікальну можливість привертати нових клієнтів. Це є критично в умовах постійно зростаючого конкурентного середовища.

Маркетплейси, додатково, пропонують вже розроблену інфраструктуру для проведення бізнесу. Вони включають в себе елементи, такі як опрацювання платежів, логістика та обслуговування клієнтів, що значно спрощує процеси для підприємств. Це важливо, оскільки дозволяє підприємствам фокусуватися на якості товарів та задоволенні потреб клієнтів, не витрачаючи час на вирішення рутинних завдань. Однак вести одночасно облік товарів на базі інтернет-магазину та різних маркетплейсів є затратною задачею з точки зору часу та ресурсів. Тому важливою прикладною задачею є синхронізація бази даних інтернет-магазинів з популярними маркетплейсами в автоматичному режимі.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Питанню синхронізації маркетплейсів з базами

даних інтернет-магазинів присвячена велика частина публікацій. Зокрема, розглядаються питання архітектурних стилів виконання таких систем [1] та алгоритмів синхронізації даних [2]. Для проектування авторами використовувалися різні підходи – агенто-орієнтований [3], сервіс-орієнтований [4], подіє-орієнтований [5], моделі-орієнтований [6]. Крім спеціальних архітектурних рішень, таких як застосування мікросервісної архітектури, застосовувалися також різноманітні засоби для забезпечення цілісності даних, наприклад блокчейн [7]. Однак, більшість даних публікацій орієнтовані на великі комерційні платформи та міжнародні маркетплейси, які не враховують локальну специфіку використання платформ маркетингу в конкретній країні. Так, наприклад в Україні, продавці частіше використовують українські маркетплейси [8]. Тому при розробці систем синхронізації варто враховувати специфіку їх роботи.

Постановка завдання. Метою дослідження є розробка веб-орієнтованої системи обліку товару на складах, що включає реалізацію механізму синхронізації з популярними маркетплейсами.

Виклад основного матеріалу. Систему обліку товарів на складах було реалізовано у вигляді веб-орієнтованого сервісу з використанням мови

програмування PHP (фреймворк Laravel) з використанням системи управління базами даних MariaDB. Карта веб-сервісу подана на рис. 1.

Головна сторінка сервісу є стартовим елементом системи та надає користувачам комплексну аналітику по стану складу та основні показники ефективності, а саме: кількість унікальних товарних позицій, собівартість залишків, ціна всіх позицій на складі, потенційний прибуток, графік продажів, діаграма наявності товарів. Комбінація цих функцій головної сторінки надає користувачам інтегрований погляд на стан складської системи та дозволяє оперативно приймати управлінські рішення з урахуванням ключових показників ефективності.

Підрозділ "Каталог" містить базу даних сутностей, що зберігаються в системі.

Сторінка категорій є частиною системи складського обліку яка включає в себе інструменти для організації та управління категоріями. Ця сторінка дозволяє користувачам легко керувати категоріями, додавати нові та редагувати існуючі, щоб забезпечити структуроване та ефективне управління асортиментом товарів на складі.

Сторінка атрибутів системи складського обліку є важливим елементом для налаштування та управління атрибутами товарів. Ця сторінка

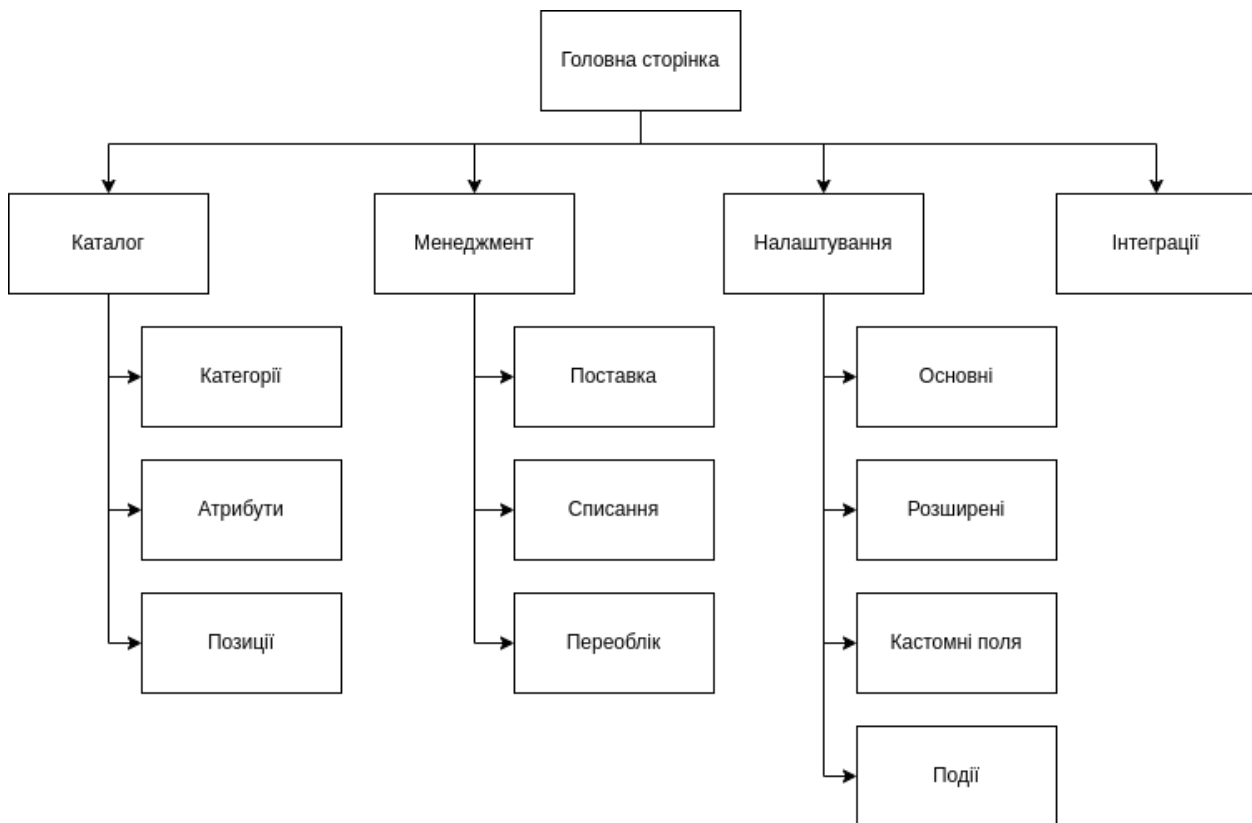


Рис. 1. Карта веб-орієнтованого сервісу

дозволяє користувачам легко управляти атрибутами, створювати нові та редагувати існуючі, а також налаштовувати значення атрибутів для докладного опису товарів на склад.

Сторінка "Каталог. Позиції" є центральною точкою для управління та налаштування товарів та позицій в системі складського обліку. Ця частина системи дозволяє ефективно управляти товарами та позиціями, забезпечуючи широкий спектр можливостей для гнучкого налаштування та редагування.

Підрозділ "Менеджмент" містить інформацію про процеси, що відбуваються із сутностями в системі.

У модулі поставок зосереджено інструменти для ефективного керування процесом постачання товарів. Цей модуль дозволяє ефективно керувати процесом постачання товарів, забезпечуючи зручний інтерфейс для створення нових поставок, редагування існуючих, а також відстеження статусів доставок товарів на склад.

У модулі списання зосереджено інструменти для ефективного керування процесом списання товарів. Ця сторінка дозволяє ефективно управляти процесом списання товарів, забезпечуючи зручний інтерфейс для створення нових списань, редагування існуючих, а також відстеження статусів списання товарів зі складу.

У модулі переобліку зосереджено інструменти для проведення переобліку товарів та відстеження змін в наявності. Ця сторінка забезпечує зручний інтерфейс для проведення переобліку товарів, додавання та редагування позицій у переобліку, а також ефективного відслідковування змін у наявності товарів.

Підрозділ "Налаштування" дозволяє керувати налаштуваннями системи.

На сторінці "Налаштування. Основні" знаходиться інтерфейс для зміни основних параметрів проекту. Ця сторінка забезпечує зручний інтерфейс для налаштування основних параметрів проекту, таких як часовий пояс, країна, мови проекту та валюти.

На сторінці "Налаштування. Розширені" розташовані таблиці для налаштування різних аспектів системи. Ця сторінка забезпечує можливість зручно налаштовувати різні аспекти системи, такі як постачальники, склади, типи витрат та шаблонів цін, забезпечуючи гнучке управління ресурсами та структурою системи.

На сторінці "Налаштування. Кастомні поля" користувач має можливість налаштовувати додаткові поля різних типів для сутностей "Прихід",

"Списання", "Переоблік" та "Товарні позиції" згідно зі своїми потребами.

На сторінці "Налаштування. Події" користувач має можливість вибрати події, на які система буде реагувати та надсилати вебхуки. Вебхук є механізмом обміну даними між різними веб-системами та програмами, який базується на архітектурі "публікація-підписка". Цей інноваційний метод комунікації дозволяє одній системі автоматично надсилати повідомлення чи дії до іншої системи при настанні певних подій або змін в її стані.

У модулі "Інтеграції" користувач має доступ до зручного інтерфейсу для керування інтеграціями з маркетплейсами. Нижче подано детальний опис функціоналу цієї сторінки. Ця сторінка забезпечує ефективний контроль інтеграцій, дозволяючи користувачеві легко керувати підключеними товарами, налаштуваннями та синхронізацією між внутрішнім та зовнішнім каталогами, а також обробляти замовлення маркетплейсу.

Розроблена система включає інтеграцію із трьома маркетплейсами: Пром, Розетка та Хорошоп.

Інтеграції можна умовно розділити на позиції та замовлення. Інтеграція позицій охоплює двосторонній обмін даними, де позиції можуть імпортуватися як з маркетплейсів до системи, так і з системи на маркетплейси.

Імпорт товарів у систему відбувається через завантаження Excel-файлу. Для кожного маркетплейса розроблено унікальний парсер, що перетворює дані з Excel-файлів у формат, сумісний з системою. Імпортовані дані включають позиції, категорії, атрибути та значення атрибутів.

Дані спочатку заносяться в проміжні таблиці, що дозволяє налаштувати процес імпорту з урахуванням специфіки кожного маркетплейса. Кожній позиції під час імпорту прив'язується унікальний зовнішній ідентифікатор, що дозволяє в майбутньому оновлювати інформацію про товар у зовнішньому каталозі. Для кожної категорії заповнюються її атрибути та значення атрибутів, використовуваних у товарах цієї категорії. Цей підхід може призвести до дублікації даних у базі даних, але збільшує гнучкість та спрощує синхронізацію каталогів.

Користувач може перейти до таблиці зовнішніх, не підключених позицій, вибрати потрібну категорію та позиції з неї для синхронізації. Варто зауважити що зв'язок категорій встановлено як багато-до-багатьох. Система дозволяє вибрати необхідні атрибути для кожного зовнішнього товару які буде імпортовано. Вибрані кате-

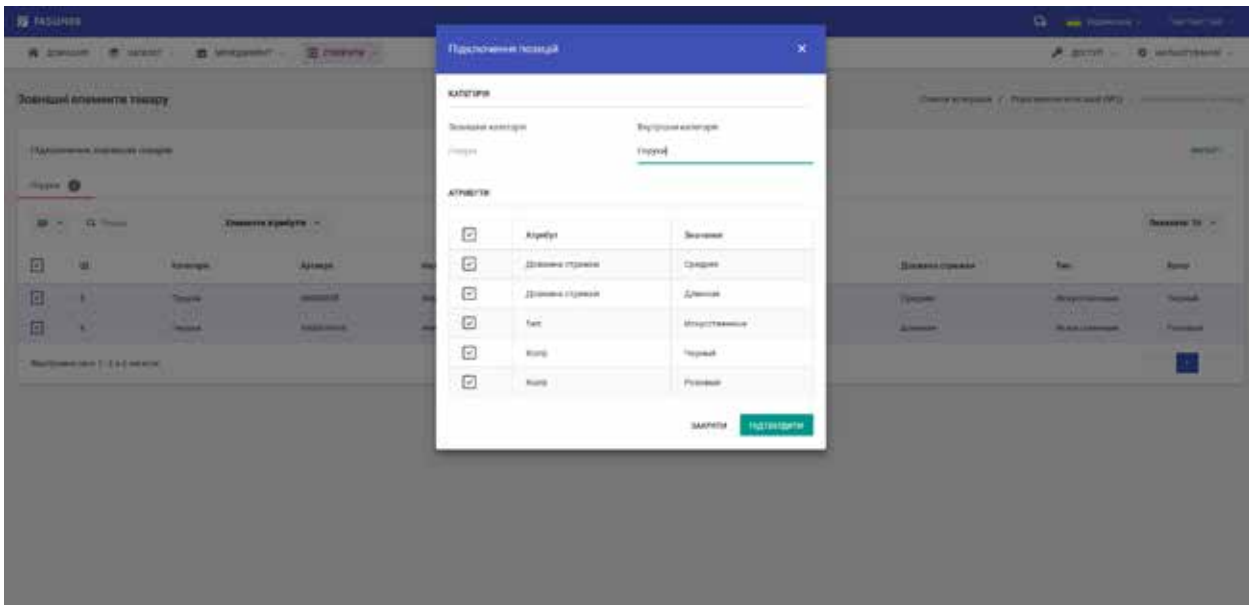


Рис. 2. Інтерфейс синхронізації замовлень у системі

горії, атрибути, значення та позиції інтегруються з внутрішнім каталогом. Категорії, атрибути та значення прив'язуються за назвою. Позиції прив'язуються за артикулом, так як це основне поле в товарних позиціях. Якщо артикул не було заповнено, тоді обов'язково створюється нова позиція.

Імпорт зображень виконується асинхронно, оскільки ця задача відчутно навантажує ресурси сервера через постійні запити на Amazon S3.

Надалі синхронізовані товари будуть потрапляти у файл експорту, який генерується кожні п'ять хвилин, а за потреби його можна оновити вручну. Файл генерується так часто для того, щоб на маркетплейсах регулярно оновлювалися залишки.

Процес синхронізації внутрішнього каталогу у зовнішній відбувається з таблиці внутрішніх, не підключених позицій. Аналогічно до дій у зовнішніх позиціях користувач виконує:

- вибір категорії для синхронізації;
- вибір позицій для синхронізації;
- налаштування назви категорії для зовнішнього каталогу;
- вибір атрибутів та значень, що імпортуються.

Далі внутрішній каталог, з його зв'язками потрапляє у зовнішній. Та бере участь у генерації

файлу експорту. Ключем для оновлення позиції у маркетплейсі стає її внутрішній ідентифікатор.

Також у користувача є можливість від'єднати синхронізовані позиції одна від одної. Це потрібно зробити у таблиці підключених позицій. Також у даній таблиці є можливість налаштувати шаблон титулу та шаблон ціни для зовнішніх позицій.

Генерацію експорт файлу реалізовано для Розетка та Пром. Для кожного маркетплейсу була реалізована логіка збору необхідних даних та формування їх у файл.

Приклад графічного інтерфейсу синхронізації замовлень розробленої системи подано на рис. 2.

Висновки. Результатом виконання даної науково-практичної задачі була реалізація механізму синхронізації обліку товарів інтернет-магазину з популярними маркетплейсами, спроектовано структуру системи, структуру бази даних та порядок синхронізації. Дана реалізація дозволяє проводити синхронізацію замовлень та товарів із популярними маркетплейсами України, і, цим самим, підвищувати якість роботи інтернет-магазинів.

Подяка. Автори хочуть подякувати Збройним Силам України та всім захисникам України за можливість продовжувати наукову та технічну діяльність під час війни.

Список літератури:

1. Gryniewicz, W., & Kutera, R. (2017). Web Oriented Architectural Styles for Integrating Service e-Marketplace Systems. International Symposium on Business Modeling and Software Design.
2. Nakatani, K., Chuang, T., & Zhou, D. (2006). Data Synchronization Technology: Standards, Business Values and Implications. Communications of the Association for Information Systems, 17, pp. 962-995.

3. Xin Chen, J. Makio and C. Weinhardt, "Agent-based Simulation on Competition of e-Auction Marketplaces," International Conference on Computational Intelligence for Modelling, Control and Automation and International Conference on Intelligent Agents, Web Technologies and Internet Commerce (CIMCA-IAWTIC'06), Vienna, 2005, pp. 910-915, doi: 10.1109/CIMCA.2005.1631584.
4. Hamada Ghenniwa & Weiming Shen (2004) Service-oriented e-Marketplace: an agent-based model, Production Planning & Control, 15:7, 696-709, DOI: 10.1080/09537280412331298193
5. J. D. Joshua and M. Z. C. Candra, "Omnichannel System Development for Integration with Various Marketplace Using Event-Driven Architecture," 2023 IEEE International Conference on Data and Software Engineering (ICoDSE), Toba, Indonesia, 2023, pp. 191-195, doi: 10.1109/ICoDSE59534.2023.10292070.
6. Cheng, Simon & Thomas, Mathews & Kumaran, S. & Rajasekharan, Amaresh & Wu, Frederick & Ye, Yiming & Huang, Ying. (2003). A Model-Driven Approach for Item Synchronization and Uccnet Integration in Large E-Commerce Enterprise Systems. 128-135. 10.1007/1-4020-2673-0_9.
7. Adiyanto, A., & Febrianto, R. (2020). Authentication Of Transaction Process In E-marketplace Based On Blockchain ??technology. Aptisi Transactions on Technopreneurship (ATT), 2(1), 68–74. <https://doi.org/10.34306/att.v2i1.71>
8. Минулого року ринок e-commerce досяг \$4 мільярдів. (2021, July 12). Дніпропетровське Інвестиційне Агенство. <https://dia.dp.gov.ua/minulogo-roku-rinok-e-commerce-dosyag-4-milyardiv>.

Slabinoha M.O., Pashkovskiy B.V., Afanasiev B.O. SOFTWARE IMPLEMENTATION OF E-STORE PRODUCTS ACCOUNTING WITH THE ABILITY TO SYNCHRONIZE WITH POPULAR MARKETPLACES

The article considers the problem of synchronizing the accounting of goods of an online store with popular marketplaces, which is important for successful online sales. In today's e-business, synchronizing inventory systems in warehouses with marketplaces is a key strategy for successful online sales. Marketplaces provide access to a large audience of buyers and infrastructure for convenient business. However, keeping records on different platforms is a time-consuming task, so automated database synchronization becomes an important aspect. An analysis of previous research and publications on architectural solutions and synchronization algorithms was carried out. Previous studies have looked at architectural styles and synchronization algorithms, but most of these articles have focused on large marketplaces without considering local specifics. The goal of the work aimed at the development of a web-oriented product accounting system, including a synchronization mechanism with popular marketplaces, is formulated. A product management system for an online store with the ability to synchronize with popular marketplaces has been developed and implemented. The implemented system uses PHP and MariaDB and provides comprehensive analytics and tools for organizing and managing categories and attributes of products in the warehouse. This allows enterprises to effectively keep track of goods and items and provides flexible management of the assortment. Functional modules of the system are described, their purpose is given. The stages of synchronization of goods and orders are described and a detailed description of the synchronization mechanism is provided. The process of importing goods, synchronizing them with marketplaces, and exporting data to update balances is described. The result of the work was the implementation of a system that improves the quality of online stores and effectively manages product flows.

Key words: marketplace, synchronization, web-oriented system, accounting of products, database.

УДК 004

DOI <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2024.2/22>

Сокульський О.Є.

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

Топольськов Є.О.

Національний транспортний університет

Жданова Ю.Д.

Київський столичний університет імені Бориса Грінченка

АНАЛІЗ МОЖЛИВОСТЕЙ ІНФОРМАЦІЙНИХ ТЕХНОЛОГІЙ З ВИКОРИСТАННЯМ МІЖМАШИННОГО ЗВ'ЯЗКУ «M2M» ДЛЯ ІНТЕРНЕТУ РЕЧЕЙ

Метою цього дослідження є аналіз можливостей машинно-машинних (M2M) та систем Інтернету речей (IoT) для побудови інтегрованої архітектури розумного будинку.

Для аналізу використано теоретичні та статистичні методи дослідження. Статистичні методи дозволяють визначити загальний зв'язок вхідних і вихідних параметрів між M2M та IoT, а також проаналізувати параметри інтеграції двох систем для побудови інтеграційної моделі.

У статті на основі теоретичних та емпіричних методів дослідження проаналізовано можливість інтеграції технологій M2M та IoT з порівнянням призначення кожної технології. Було виявлено, що при інтеграції комунікаційних систем M2M з пристроями IoT інтеграція складається з основних, таких як провайдери, Інтернет-сервіси, платформи та сервіси. Однак для інтеграції важливо враховувати основні аспекти, які складаються з протоколів і стандартів, хмарних технологій, аналітики даних, безпеки та безпеки, інтеграції з існуючими системами, моніторингу та управління. Крім того, також аналізується, що інтеграція M2M з IoT поєднує фактори для її забезпечення, що включає наступне: забезпечення зв'язку; аналітика, збір та обробка даних; ефективно управління ресурсами, безпека та шифрування; масштабованість і гнучкість; енергоефективність та оптимізація.

Дослідження аналізує можливість інтеграції M2M з IoT для побудови архітектури розумного будинку за допомогою дротових і бездротових мереж. Проаналізовано основні характеристики та відмінності між M2M та IoT, на основі яких побудовано архітектуру розумного будинку на прикладі двокімнатної квартири.

На основі архітектури M2M з використанням дротових і бездротових технологій в технології Smart Home проаналізовано алгоритм послідовності зв'язку обладнання M2M з пристроями IoT за допомогою бездротових і дротових мереж. Програми та додатки, що використовують інтеграцію M2M з IoT, забезпечують керування сполученими пристроями за допомогою смартфона, де здійснюється моніторинг та управління освітленням, побутовою технікою тощо.

Ключові слова: машина-машин, Інтернет речей, інтеграція, шлюз, бездротові мережі, розумний будинок.

Постановка проблеми. Інтернет речей (IoT) завдяки своїм можливостям відіграє важливу роль в наступному революційному рівні розвитку інформаційних технологій після комп'ютерів, Інтернету та мобільного телефонного зв'язку. Незважаючи на те, що IoT активно розвивався протягом останніх 20 років його можливості дозволяють поєднувати всі можливі сфери діяльності повсякденного життя [1]. Розвиток Інтернету речей обумовлений тим, що завдяки збільшенню чисельності користувачів Інтернету та модифі-

кації технологій роботи в Інтернеті дозволило об'єднати в одну мережу повсякденні об'єкти та системи. З іншого боку Інтернет речей відноситься до інноваційної технології, яка фокусується на взаємозв'язку між гаджетами та людьми або клієнтами для досягнення поставлених цілей та задач в залежності від потреб користувачів [1-2].

Сучасні технології розширили можливості передачі та обробки даних, що обумовлено розвитком та появою розумних систем, які працю-

ють без участі людського фактору. Міжмашинний зв'язок (M2M) та IoT є суттєвими аспектами сучасних технологій, де за допомогою M2M здійснюється обмін даними між пристроями, тоді як IoT розширює це поняття, з'єднуючи різні пристрої в інтернет для обміну інформацією та автоматизації процесів [1, 3].

Розвиток IoT посприяло виникненню промислового IoT (який спочатку був запропонований для розмежування промислових та споживчих додатків з метою об'єднання виробництва і IoT), що складається з інтелектуальних та взаємопов'язаних мереж з різними промисловими компонентами, які досягають вищої продуктивності та нижчих операційних витрат завдяки моніторингу в режимі реального часу, де важливу роль відіграють машини, які можуть обмінюватися даними між собою та підтримувати стабільний зв'язок. На відміну від IoT промисловий IoT потребує більш вищої стабільності, доступності та безпеки, однак за останні роки промисловий IoT широко застосовується для «розумних» міст та технологій, наприклад, для нафтогазової та газопереробної промисловості, аграрної промисловості, машинобудівній та літакобудівній промисловості тощо [4]. Велика кількість додатків, таких як «розумна» нафтогазова промисловість, «розумний» транспорт, «розумні» електромережі засновані на основі використання концепції інтелектуальних пристроїв IoT, які мають можливості зондування, активації, зберігання та обробки даних, що в свою чергу створює складні проблеми в мережі [5].

На відміну від машин, пристрої IoT мають можливість взаємодіяти через мережу за допомогою різних мережевих протоколів, наприклад, WiFi (802.11), ZigBee (802.16), Bluetooth (802.15), або за допомогою інтеграції з сумісними датчиками і виконавчими пристроями [6, 7]. Використання інтелектуальних (розумних) технологій Інтернет речей дозволяють інтегрувати та контролювати розумними пристроями, послугами та сервісами, а також об'єднувати фізичний світ з цифровим [7]. Однак поширення та розвиток технологій Інтернету речей призвело до появи нових викликів та проблем, які пов'язані з вразливістю в системі безпеки [8, 9].

Аналіз останніх досліджень і публікацій. IoT залишається основною частиною, яка відіграє важливе значення для пристроїв та комунікаційних систем майбутнього покоління, які забезпечують не тільки отримання та обробку даних, але й керування ними за допомогою машинного

взаємозв'язку M2M [10]. Інтенсивне зростання комунікаційних пристроїв, обчислювальної та вимірювальної техніки посприяло розвитку та виникненню глибокої технології, відомої як зв'язок між машинами (M2M), яка розроблена на основі крос-платформної інтеграції. З цією метою у дослідженні [11] наведено порівняльний аналіз різних протоколів та архітектури M2M (де для оцінки протоколів використовувалися Raspberry-Pi та ОС Raspbian), що надає уявлення про важливість технології, яка необхідна для взаємодії між машинами з використанням технології Інтернету речей.

Для того, щоб машини могли взаємодіяти між собою використовується технологія бездротового зв'язку, наприклад, в роботі [12] авторами наведений огляд сучасних викликів та досягнень в галузі бездротового зв'язку для M2M-з'єднання в IoT. Це підкреслює важливість бездротового зв'язку з метою забезпечення безперебійного підключення та обміну даними між машинами в різних галузях та сферах застосування. Однак бездротовий зв'язок вказує на необхідність застосування ефективних та надійних протоколів для підтримки зростаючої кількості взаємопов'язаних пристроїв та систем в IoT.

Останнім часом «розумні» технології найчастіше згадуються в дослідженнях, які зосереджені на прагненні автоматизувати всі процеси отримання, обробки та зберігання даних до Інтернету речей, проте, існують також сучасні виклики та проблеми. Наприклад, в роботі [13] наведено огляд досліджень, які пов'язані з проблемами безпеки, комунікації та оптимізації з якими стикається зв'язок між IoT та M2M. Окрім того, потрібно розуміти, що також існують проблеми підключення мережевих пристроїв до M2M-мережі, як описано в роботі [14].

Для підвищення безпеки даних в роботі [15] авторами запропонований інтелектуальний механізм, який автоматично виявляє атаки на пристрої IoT за допомогою фреймворку «машина-машина» (M2M), який розроблений за допомогою різних інструментів криміналістичного аналізу та машинного навчання. В дослідженні [16] проаналізованого бізнес-моделі промислового Інтернету-речей в контексті міжмашинної взаємодії в контексті «машина-машина», на основі чого розроблено концептуальну основу з метою проведення класифікації різних типів інноваційних бізнес-моделей для компаній, що працюють у бізнес-просторі M2M. Одночасно з цим, авторами в роботі [17] з'ясовано, що технологія «машина-

машина» є специфічним дискурсивним середовищем Інтернету речей для підключення інтелектуальних пристроїв, підтримка якого вимагає базової концептуальної схеми, де авторами пропонується оцінка різних онтологічних моделей, які розглядають M2M та IoT одночасно, визначаючи синтаксичний та семантичний потенціал таких пристроїв.

Окрім того, використання комбінованої технології систем M2M та IoT вимагає стандартизації архітектури, яка дозволить проводити розпізнавання ідентифікаційних даних, мережевого зв'язку та інших питань в системі IoT. Наприклад, в роботі [18] автори зосередилися на дослідженні бездротового зв'язку між машинами, що працює трьома способами, а саме: машина-машина, машина-мобільний телефон та мобільний телефон-машина.

До основних проблем використання M2M та IoT відноситься: безпека (збільшення кількості підключених пристроїв створює ризики щодо безпеки даних та конфіденційності, вимагаючи ефективних заходів захисту); стандартизація (відсутність єдиної стандартної архітектури та протоколів може ускладнювати взаємодію між різнорідними пристроями та системами); масштабованість (з приростом кількості підключених пристроїв виникають виклики управління та обробки великої кількості даних); енергоефективність (багато пристроїв IoT працюють від батареї, тому ефективне використання енергії є критичним); конфіденційність даних (збір та обробка даних великої кількості особистих даних може породжувати етичні питання та вимагати суворих правил) [19-21].

Постановка завдання. Метою даного дослідження є проведення аналізу можливостей систем міжмашинного зв'язку (M2M) та Інтернет речей (IoT) для побудови інтегрованої архітектури «розумного» будинку. Завданням цього дослідження є дослідити ключову залежність використання шлюзу та пристроїв IoT за допомогою бездротової мережі Wi-Fi з метою визначення параметрів відстані та кількості між пристроями та шлюзом для «розумної» технології управління будинком.

Для проведення аналізу використовувалися теоретичні та статистичні методи дослідження. Зокрема, аналіз та синтез наукової та спеціальної літератури з технічних спеціальностей та програмування з метою визначення сутності використання M2M в поєднанні з IoT, де порівнюються між собою призначення кожної з технологій,

а також визначаються особливості цих інформаційних систем. Статистичні методи дозволяють визначити спільний взаємозв'язок вхідних та вихідних параметрів між M2M та IoT, а також дозволяють проаналізувати параметри інтеграції двох систем для побудови інтеграційної моделі. На основі проаналізованих літературних джерел та статистичних результатів розглянемо інтеграцію систем M2M та IoT для побудови архітектури розумної технології управління будинком.

Виклад основного матеріалу

Інтеграція систем M2M та IoT для архітектури розумної технології

Інтеграція систем M2M з IoT включає об'єднання пристроїв, сенсорів, мереж для забезпечення ефективного обміну даними та автоматизації процесів. Це дозволяє збирати, аналізувати та використовувати дані для оптимізації функціоналу та прийняття рішень в реальному часі.

Мережа M2M містить безліч різних вузлів зв'язку, в яких основним об'єктом є машина (пристрій), однак енергоефективність є основною проблемою, оскільки декілька пристроїв можуть працювати від батареї одночасно. Декілька пристроїв здатні виробляти великі масиви даних з різним форматом, розміром та періодом. Комунікація відбувається без втручання людини, що вимагає безперебійної та стабільної мережі.

Телекомунікації передбачають собою те, що вся необхідна інформація про віддалене середовище по суті надається оператором, а основне з'єднання створюється в режимі зв'язку ведучого і веденого, що називається M2M-зв'язком за допомогою Інтернет. Протяжність вузлів один від одного величезна, затримка передачі даних може порушити роботу системи, що в результаті впливає на продуктивність роботи, а якість зв'язку та показники продуктивності є важливими аспектами будь-якої комунікації. В іншому випадку продуктивність мережі знижується, якщо в ній присутній зловмисний вузол, де відбувається некоректна поведінка вузла, що призводить до зловмисних атак та втрату пакетів, які порушують правила маршрутизації й впливають на спотворення передачі даних, а також на скидання та втрату даних [22].

Інтеграція екосистеми M2M-комунікацій у поєднанні з IoT зображена на рис. 1, де показано архітектуру, яка складається з екосистеми M2M та окремих типів провайдерів, таких як пристрій, інтернет-сервіси, платформи, сервіси та користувачі, а також з мережевого стеку IoT. Мережевий стек IoT складається з наступного:

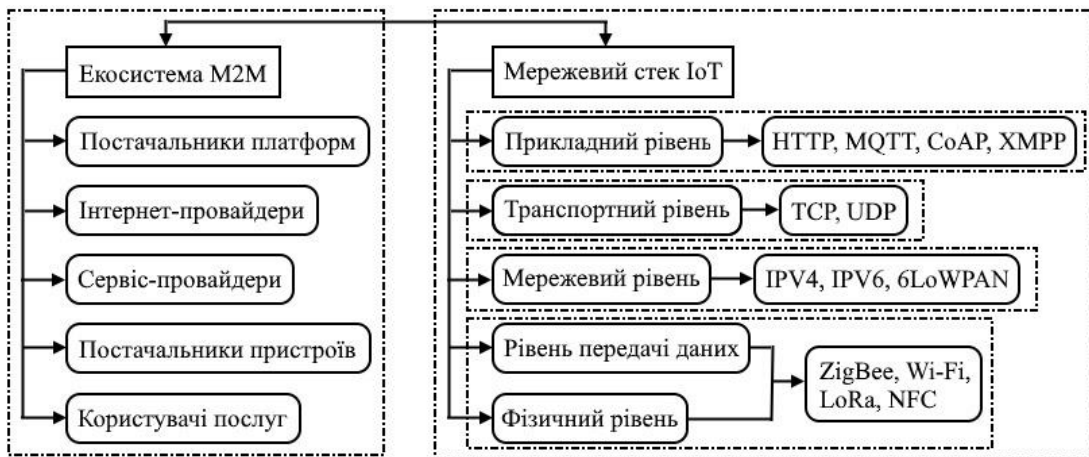


Рис. 1. Інтеграція систем M2M-комунікацій у поєднанні з пристроями IoT

Сформовано авторами на основі [7]

– прикладний рівень, який містить протоколи HTTP (HyperText Transfer Protocol), MQTT (Message Queuing Telemetry Transport), CoAP (Constrained Application Protocol), XMPP (eXtensible Messaging and Presence Protocol);

– транспортний рівень, який містить протоколи TCP (Transmission Control Protocol), UDP (User Datagram Protocol);

– мережевий рівень, який складається з протоколів IPV4, IPV6 (Internet Protocol 4 версії та 6), де стандарт 6LoWPAN взаємодіє по протоколу IPV6, який дає можливість малопотужним пристроям обмінюватися інформацією один з одним;

– рівень передачі даних та фізичний рівень об’єднують в собі використання бездротових мереж, таких як Wi-Fi, ZigBee (специфікація мережевих протоколів верхнього рівня), LoRa (Long Range) та NFC (Near Field Communication).

Сфера застосування класифікується на транспорт, бізнес, послуги в реальному часі, дистанційне управління та моніторинг тощо. Важливим компонентом M2M комунікації є внутрішній сервер. Для всіх пристроїв створюється інтегрована точка збору даних, де M2M-пристроїв можуть бути стаціонарними, наприклад, мобільні гаджети, периферійні пристрої, побутова техніка та інше, що пов’язане та об’єднує в собі розумні технології.

Інтеграція технології M2M та IoT є ключовим етапом для створення ефективних та сучасних систем. Основні аспекти цієї інтеграції включають:

– протоколи та стандарти, де використовуються спільні протоколи, наприклад, MQTT (Message Queuing Telemetry Transport) або CoAP (Constrained Application Protocol), які дозволяють

різним пристроям спілкуватися та обмінюватися даними;

– хмарні технології, де використовуються хмарні платформи для збору, зберігання та обробки даних з пристроїв IoT та машин з метою покращення доступності та аналізу даних (наприклад Microsoft Azure IoT);

– аналітика даних, де впровадження аналітики даних дозволяє отримувати цінну інформацію та аналізувати процеси збору інформації на кожному етапі, що полегшує прийняття рішень та оптимізацію процесів;

– безпека та захист, де забезпечується безпека даних та захист пристроїв за допомогою шифрування та механізмів аутентифікації (SIEM – система, яка допомагає аналізувати та проводити моніторинг подій з питань безпеки з різних джерел, наприклад, файли журналів, сенсори та системи виявлення вторгнень IDS/IPS);

– інтеграція з існуючими системами, що дозволяє інтегрувати нові пристрої та технології вже існуючих систем, що полегшує розвиток та модернізацію;

– моніторинг та управління, де системи моніторингу та управління дозволяють в режимі реального часу відстежувати стан пристроїв, які підключені до мережі.

На основі інтеграції M2M-комунікації у поєднанні з IoT можливе створення інтелектуальних та підтримуючих інноваційних рішень в різних галузях. Розглянемо основні фактори для забезпечення інтеграції M2M з IoT, що складається з наступного: забезпечення зв’язку та надійність мережі (де технології M2M можуть забезпечити стійкий та надійний зв’язок між різними пристроями, що є критичним для оптимальної роботи

IoT); дані, аналітика, збір та обробка даних (де M2M дозволяє збирати великі обсяги даних з підключених пристроїв, що створює базу для аналізу та прийняття рішень); ефективне управління ресурсами та автоматизація (можливість автоматизації через M2M сприяє ефективнішому використанню ресурсів та оптимізації бізнес-процесів); безпека, ідентифікація, аутентифікація та шифрування (технології M2M дозволяють впроваджувати ефективні механізми шифрування та аутентифікації для захисту даних); масштабованість та гнучкість мережі (M2M може пристосуватися до зростаючого обсягу підключених пристроїв, забезпечуючи масштабованість мережі); енергоефективність та оптимізація витрат енергії (технології M2M можуть допомогти в розробці енергоефективних рішень для пристроїв IoT, що працюють від батарей) [24].

Інтеграція систем з використанням архітектури M2M та бездротових мереж у поєднанні з IoT

Інтеграція систем M2M з IoT обумовлює в собі об'єднання компонентів міжмашинної комунікації з пристроями IoT для збору даних за допомогою бездротової та локальної мережі (Wi-Fi), а також персональної мережі (Bluetooth). В якості інтеграції необхідно розглянути та проаналізувати архітектуру M2M з використанням дротових та бездротових мереж з пристроями IoT, а також проаналізувати основні характеристики та відмінності технологій, щоб побудувати в якості дослідження архітектуру M2M з використанням бездротової мережі для технології «розумного» будинку на прикладі двокімнатної квартири.

Для того, щоб побудувати архітектуру технології «розумного» будинку за допомогою M2M та IoT необхідно спочатку проаналізувати можливості доменів на рис. 2, де домен M2M з'єднує декілька вузлів і шлюз (gateway), що

дозволяє надавати різноманітні автоматизовані послуги [23]. Кожен вузол включає в себе різноманітні функції, наприклад, попередня обробка даних, збір даних, комунікаційні інтерфейси, унікальні адреси, зберігання даних та джерела живлення тощо.

Вони можуть приймати інтелектуальні рішення і передавати дані до шлюзу в режимі одного або декількох стрибків. Вбудовані вузли збирають пакети і можуть інтелектуально управляти пакетами, а також забезпечувати ефективні способи відправки пакетів на віддалений сервер через мережу. Мережа складається з різноманітних точок приєднання. Тут конвергентна гетерогенна мережа забезпечує оптимальне зондування пакетів для ефективної та надійної передачі каналів в M2M областях застосування M2M. Пристрої підключаються до основної мережі, а дротове рішення забезпечує найвищу швидкість передачі даних, надійність, безпеку та низьку затримку, але всі M2M-з'єднання в результаті цього можуть бути втрачені. Однак низька швидкість передачі даних, слабка захищеність і серйозні перешкоди згадані в універсальній інфраструктурі, які створюють обмеження в використанні M2M.

Для того, щоб проаналізувати можливості «розумної» технології на основі використання технології M2M та IoT розглянемо в якості прикладу двокімнатну квартиру, яку показано на рис. 3, де показано основні місця розташування «розумних» пристроїв, які можуть з'єднуватися між собою за допомогою технології безпроводної локальної мережі WiFi та наявності смартфона. Квартира містить дві спальні кімнати, вітальню з кухнею, дві ванні кімнати та лоджію.

Технологія M2M в поєднанні з IoT є ефективним рішенням для створення та оцифрування робочих процесів з метою ефективного використання ресурсів та ефективності. Технологія

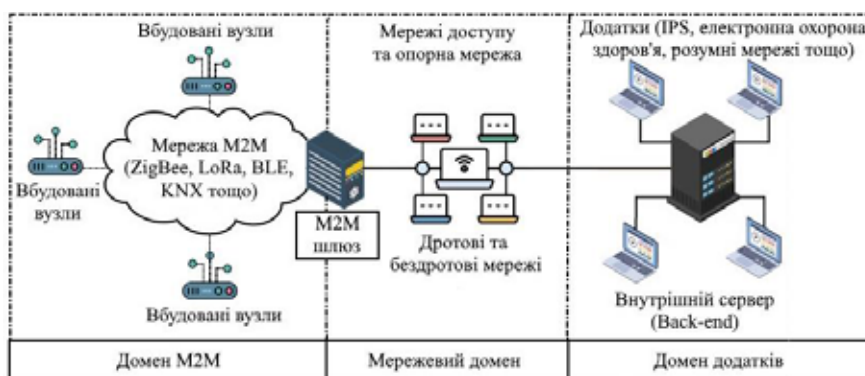


Рис. 2. Архітектура M2M з використанням дротових та бездротових мереж у поєднанні з Інтернет речей
Сформовано авторами на основі [3, 25]

Характеристика та відмінності технологій IoT та M2M

Технологія	Характеристики	Відмінності
Міжмашинний зв'язок (M2M)	<ol style="list-style-type: none"> Підвищення ефективності, що дозволяє пристроям автоматично обмінюватися даними та взаємодіяти між собою з метою оптимізації процесів, зменшення витрат та підвищення продуктивності. Моніторинг та діагностика проводиться за допомогою віддаленого спостереження різних параметрів (температура, вологість тощо), що дозволяє операторам вчасно реагувати на проблеми та здійснювати планове обслуговування. Покращення сервісу для клієнтів, де M2M дозволяє збирати дані про використання продуктів або послуг (наприклад, автоматичне вивчення звичок споживачів та надання персоналізованих пропозицій). Управління мережею, що дозволяє ефективно керувати мережею за допомогою підключених пристроїв, забезпечуючи оптимальне використання ресурсів та мінімізацію витрат. Вдосконалення та розвиток нових послуг, де відкривається шлях для створення нових продуктів та послуг, які базуються на автоматизації та взаємодії між пристроями (системи дистанційного контролю, системи «розумного» будівництва чи системи управління транспортними потоками). Безпека і збереження даних, де M2M вимагає великої уваги до захисту даних, оскільки обмін даними відбувається без участі людини, що включає в собі захист від зламу, шифрування даних та правильне керування доступом. 	<ol style="list-style-type: none"> З'єднання "точка-точка" часто включає в себе обладнання на території клієнта; Багато пристроїв підключаються до мережі через стільникові або кабельні з'єднання; Призначений для невеликих проектів; Пристрої M2M не завжди повинні бути підключені до інтернету; Оскільки пристрої повинні дотримуватися однакових протоколів зв'язку, вибір інтеграції обмежений
Інтернет речей (IoT)	<ol style="list-style-type: none"> Моніторинг і управління дозволяє в реальному часі проводити спостереження за станом різних пристроїв та систем, включаючи обладнання, транспортні засоби, будівлі тощо, що забезпечує підприємствам виявляти проблеми. Оптимізація процесів, де IoT може оптимізувати різні процеси, включаючи виробництво, логістику, енергетику тощо (наприклад, за допомогою сенсорів та аналітики даних можна зменшити втрати енергії, оптимізувати маршрути, автоматизувати виробничі процеси тощо). Покращення сервісу для клієнтів, де IoT дозволяє компаніям збирати дані про використання своїх продуктів або послуг з наданням рекомендацій. Розробка нових продуктів та послуг, де IoT відкриває двері для розробки нових продуктів та послуг, які базуються на підключених пристроях (розумні пристрої для дому, медичні пристрої для моніторингу здоров'я, системи безпеки тощо). Збільшення продуктивності та зменшення витрат, де IoT може сприяти збільшенню продуктивності за рахунок автоматизації процесів і зменшення витрат, що пояснюється ефективним використанням ресурсів. Покращення якості життя, де IoT може забезпечувати зручність та комфорт у повсякденному житті (наприклад, за допомогою розумних систем управління будинком підвищується безпека та зменшуються витрати на комунальні послуги). 	<ol style="list-style-type: none"> Мережа складається з віддалених та локальних пристроїв, які передають інформацію через IP; Дані передаються через хмарний проміжний рівень Зазвичай можна масштабувати для великих проектів У більшості випадків пристрої потребують безперервного доступу до інтернету

Сформовано авторами на основі [7, 24, 25]

M2M та IoT з'єднує пристрої через IP-мережі з метою моніторингу та контролю, що дозволяє отримувати інформацію з взаємопов'язаних при-

строїв. Окрім того, шлюз IoT (NXP Modular IoT) є мережевим з'єднувальним пристроєм, який використовується для з'єднання двох пристроїв



Рис. 3. Зразок двокімнатної квартири для проведення аналізу дослідження

Сформовано авторами

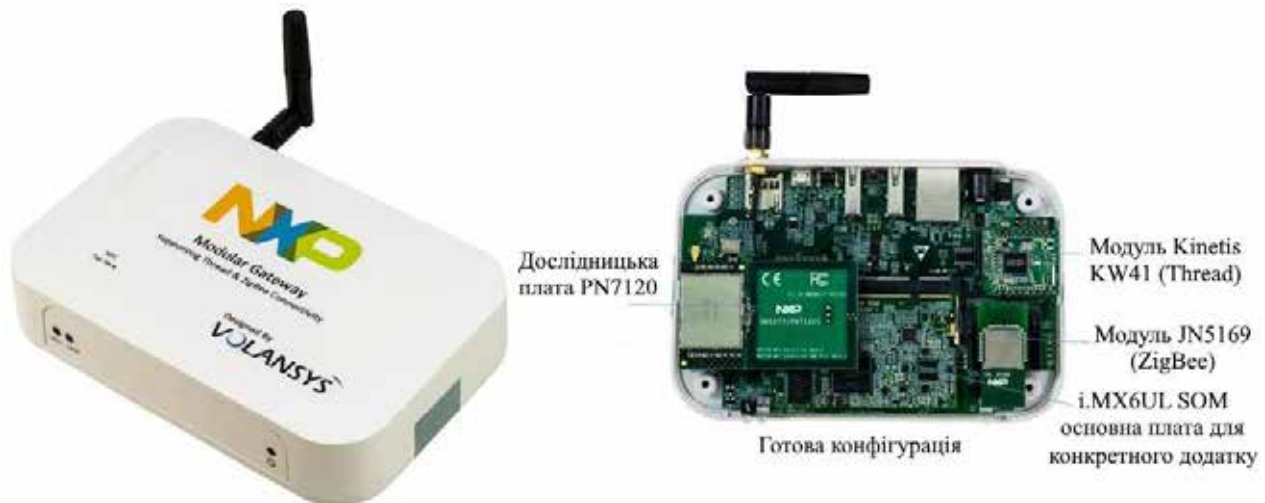


Рис. 4. IoT Modular Gateway Solution від компанії «NXP»

Сформовано авторами

в двох рівних мережах. Шлюз NXP Modular IoT використовується для крупних вузлів мережі на основі системи з модулем Volansys і MX6UL з підтримкою протоколів безпроводного зв'язку, таких як ZigBee, NFC, а також містить допоміжні модулі Wi-Fi та Bluetooth. Основна функція шлюзу полягає в тому, що слугує «дверима» між двома мережами, що може бути сервером, брандмауером, маршрутизатором або будь-яким іншим пристроєм, який використовує трафік для проходження через мережу. Шлюзи слугують точками входу і виходу мережі, так як всі данні повинні проходити через комунікаційний шлюз, перш ніж вони дійдуть до маршрутизатора. На рис. 4 показано шлюз Modular IoT від компанії «NXP», який

містить в собі безліч модулів для підтримки бездротового зв'язку, наприклад, Wi-Fi, Bluetooth, ZigBee, Thread, NFC для використання пристроями IoT.

Далі розглянемо архітектуру M2M з використанням дротових та бездротових технологій в технології Smart Home. На рис. 5 показано алгоритм послідовності прив'язки обладнання M2M з пристроями IoT за допомогою бездротових та дротових мереж. Застосунки та додатки за допомогою інтеграції M2M з IoT забезпечується контроль спарених пристроїв за допомогою смартфона, де здійснюється контроль та керування освітленням, побутовою технікою тощо. Окрім того, на рис. 5 показано шлюз M2M, взаємодію з мере-

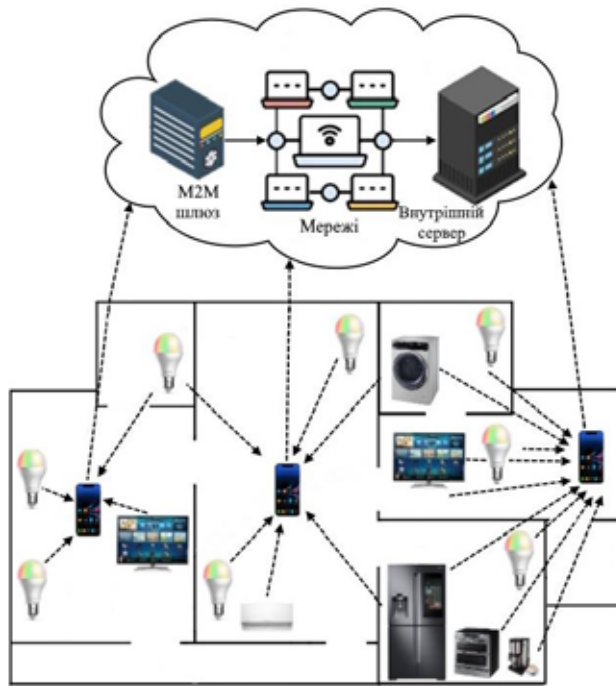


Рис. 5. Архітектура M2M з використанням дротових та бездротових технологій в технології Smart Home

Сформовано авторами

жами та внутрішній сервер, що дозволяє взаємодіяти машинам з IoT за допомогою смартфона. Також на рисунку показано основну побутову техніку та прилади, які мають взаємодіяти з технологією M2M. Наприклад, за допомогою смартфона (POCO X3 PRO) відбувалася взаємодія з технологією «розумного» будинку, яка дозволяє керувати освітленням в приміщенні, побутовими приладами, сантехнікою, а також системами мультимедіа.

Важливим компонентом M2M-комунікації є внутрішній сервер. Для всіх пристроїв створюється інтегрована точка збору даних. M2M-пристрої можуть бути стаціонарними, такими як побутова техніка або мобільні пристрої. Пристрої підключаються до основної мережі за допомогою мережі Access. А дротове рішення забезпечує найвищу швидкість передачі даних, надійність, безпеку та низьку затримку, але всі M2M-з'єднання в результаті цього можуть бути втрачені. Однак низька швидкість передачі даних, слабка захищеність і серйозні перешкоди згадані в універсальній інфраструктурі, створюють обмеження на використання M2M [26].

Принципи вимірювання відстані та кількості підключених пристроїв з використанням шлюзу для пристроїв IoT

Використання шлюзу для IoT розглядається з використанням позиційного підходу з евклі-

довою відстанню, який заснований на позиціюванні, де відстань вимірюється за допомогою формули прямої відстані між двома точками. Для вимірювання евклідової відстані між пристроями та шлюзом використовується наступна формула [22, 26]:

$$ED = \sqrt{(q_2 - q_1)^2 + (p_2 - p_1)^2} \quad (1)$$

де ED – евклідова відстань; q_1, p_1 , – координати шлюзу та q_2, p_2 – координати пристрою IoT у прямокутній системі координат.

Цю залежність на основі рівняння можна зобразити графічно, де на рис. 6 показано відстань між двома точками згідно з теоремою Піфагора.

Окрім того, рівняння для вимірювання евклідової відстані між окремими пристроями та різними точками доступу до шлюзу враховує також розташування окремих вузлів, які можуть збігатися між собою, що дозволяє вимірювати відстань для компактних або ізольованих кластерів для бездротової мережі [22].

Наведемо розрахунки евклідової відстані, де координати шлюзу q_1, p_1 дорівнюють 3 і 5, а координати пристрою IoT q_2, p_2 дорівнюють 7 і 9. Підставляємо дані згідно з рівняння (1):

$$ED = \sqrt{(7 - 3)^2 + (9 - 5)^2}$$

$$ED = \sqrt{(4)^2 + (4)^2} = \sqrt{16 + 16} = \sqrt{32} \approx 5,65$$

Отже, евклідова відстань між шлюзом та пристроєм IoT складає приблизно 5,66 м.

До обмеження евклідової відстані відноситься те, що якщо значення атрибутів в двох векторах даних не є нормальним, то тоді відстань між цими двома векторами може бути меншою, ніж між парою інших векторів даних з ідентичними значеннями атрибутів.

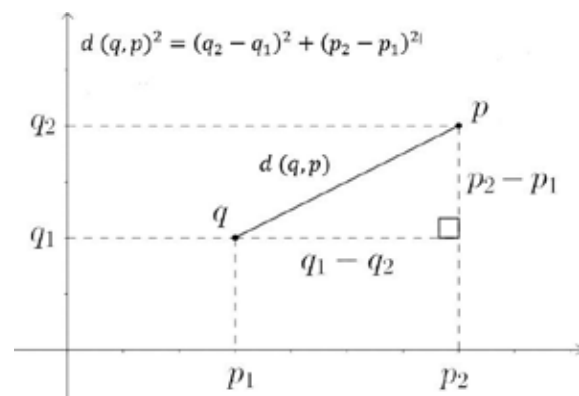


Рис. 6. Відстань двох точок у прямокутній системі координат на основі теореми Піфагора

Далі розглянемо приклад обчислення кількості підключених пристроїв IoT за допомогою формули (2). Ця формула може бути корисною для оцінки масштабу мережі IoT і розрахунку необхідних ресурсів для її підтримки [27]. Припустимо, що наші вихідні дані згідно рис. 5 складають:

- загальна кількість пристроїв, які необхідно підключити до мережі IoT $N = 15$;
- максимальна кількість пристроїв, яку може підтримувати шлюз $M = 20$.

Формула для обчислення кількості необхідних шлюзів:

$$W = \left\lceil \frac{N}{M} \right\rceil \quad (2)$$

Тоді $W = \left\lceil \frac{15}{20} \right\rceil = [0,75] = 0,75$ (1 шлюз)

Отже, для підключення 15 пристроїв IoT в двокімнатній квартирі достатньо одного шлюзу.

Припустимо, що під час дослідження необхідно проводити моніторинг мережі IoT протягом 24 годин ($t=24$), а середній інтервал між кожним підключеним пристроєм становить 30 хвилин ($\tau = 30$). Розрахуємо кількість підключених пристроїв:

$$k = \frac{t}{\tau} = \frac{24}{0,5} = 48$$

Таким чином, очікується, що за 24 години моніторингу матимемо приблизно 48 пристроїв IoT за умови, якщо середній інтервал між повторними підключеннями становитиме 30 хв.

В даній роботі на основі інтеграції систем з використанням архітектури M2M та бездротових технологій у поєднанні з пристроями IoT було досліджено та проаналізовано можливості технології «розумного» будинку. В якості аналізу розглядалися можливості технології «розумного» будинку згідно з принципами, які пов'язані з вимірюванням відстані та обчисленням кількості пристроїв для використання шлюзу Modular IoT від компанії «NXP», де для підключення 15 пристроїв через бездротову технологію Wi-Fi знадобився один шлюз, який на основі розрахунку евклідової відстані повинен забезпечувати підключення на відстані від 5,65 м і більше. Протягом 1 доби загальна кількість підключених пристроїв склала 48 одиниць з повторним підключенням до мережі.

Результати були отримані на основі теоретичних та статичних методів, а також проведеного літературного огляду, де розглядалися схожі за темою дослідження інших авторів. На основі отриманих результатів в нашому дослідженні

можна провести порівняння з іншими роботами, де замість принципів розглядаються алгоритми розгортання шлюзу, де в роботі [22] описується рішення розміщення шлюзів, що забезпечує підвищення загальної ефективності мережі IoT, оскільки великий обсяг даних створюється для підтримки різних додатків в розумних технологіях. Окрім того, автором також розглядається оптимізація енергоефективності системи на основі відстані для досягнення оптимальної пропускної здатності бездротової мережі. Проаналізувавши отримані результати нашого дослідження можна зробити припущення, що в роботі [22] автором наведений короткий опис використання формул (де згадуються формули евклідової відстані та позиційного підходу з Манхеттенською відстанню без наведення розрахунків) для вибору оптимального шлюзу та алгоритмів (вибір місця розташування шлюзу).

Технологія «розумного» будинку враховує безліч факторів та пристроїв, які описуються використанням побутової техніки, освітлення, кондиціонерів та електроніки, що в загальному дозволяє обмінюватися даними дистанційно за допомогою безпроводних мереж та хмарних платформ. Тому наше дослідження спрямоване на вивчення системи домашньої автоматизації, яка дозволить автоматизувати всі важливо необхідні процеси для життєзабезпечення користувачів з метою задоволення власних потреб. В роботі [28] в якості такої системи пропонується Wireless Fidelity як комунікаційний інтерфейс, що дозволяє заощадити на розробці системи домашньої автоматизації, а також інтегрувати з комерційними продуктами.

Архітектура технології систем M2M в поєднанні з пристроями IoT містить певні характерні особливості, які розглядаються для сучасних досліджень, але якщо провести порівняння з іншими наявними дослідженнями, то тоді можна зробити наступний висновок. В роботі [29] авторами описується одна з задач нашого дослідження, що обумовлюється реалізацією архітектури, яка дасть змогу контролювати та допомагати користувачам розраховувати споживання енергії за допомогою технологій Інтернету речей, а також пропонує детальну інформацію про споживання та рекомендує засоби для покращення оптимізації.

Окрім використання бездротової технології Wi-Fi для передачі даних, також активно розвиваються та вдосконалюють вертикалі IoT, які працюють з підключенням до SIM-карт мобільного зв'язку, що спрямоване на масштабне дослідження

дження комерційно розгорнутих SIM-карт IoT для лічильників, в якості «розумних» пристроїв.

До обмежень нашого дослідження можна віднести наступне: обмежені літературні джерела для вимірювання відстані з використанням шлюзу M2M для пристроїв IoT; складне середовище розумного будинку, що пояснюється різною конфігурацією та стандартами зв'язку (стандартизація та сумісність); конфіденційність даних, де в роботі описується більше інтеграція, архітектура та масштабованість мережі, але менш значної ролі приділяється питанням безпеки та цілісності даних.

В якості перспективи для подальших досліджень необхідно буде в першу чергу акцентувати увагу на протоколи зв'язку з використанням стандартів, а також проаналізувати можливості використання «розумних» технологій для управління енергоефективністю будинком.

Практична цінність отриманих результатів дозволить іншим дослідникам звернути увагу на використання інтегрованої архітектури з використанням систем M2M та бездротових мереж в поєднанні з пристроями IoT, де автори зможуть використовувати принципи вимірювання відстані та кількості підключених пристроїв IoT з використанням різних видів шлюзу.

Висновки. В даній роботі згідно з поставленими задачами дослідження розглянуто та про-

аналізовано можливість інтеграції екосистеми M2M-комунікації у поєднанні з пристроями IoT, де досліджено основні аспекти інтеграції з існуючими інформаційними системами для побудови архітектури M2M з використанням бездротових мереж та пристроїв IoT. Досліджено характерні риси, характеристики та відмінності технологій M2M та IoT для побудови архітектури «розумної» технології управління будинком з використанням IoT Modular Gateway Solution від компанії «NXP».

В якості експериментальних досліджень використовувалися принципи для вимірювання відстані між пристроями IoT та шлюзом, а також наведені розрахунки кількості підключених пристроїв, де для підключення 15 пристроїв через бездротову технологію Wi-Fi знадобився один шлюз, який на основі розрахунку евклідової відстані повинен забезпечувати підключення на відстані від 5,65 м і більше. Протягом 1 доби загальна кількість підключених пристроїв склала 48 одиниць з повторним підключенням до мережі.

Практична цінність отриманих результатів полягає в вивченні комунікаційних процесів між шлюзом M2M та пристроями IoT за допомогою бездротового зв'язку, де з'ясовано, що кількість шлюзів суттєво впливає на відстань між пристроями та шлюзом, а також на кількість підключених пристроїв до шлюзу, де для одного шлюзу кількість пристроїв не повинна перевищувати 20 одиниць.

Список літератури:

1. Samy M.M., Anis W.R., Abdel-Hafez A.A., Eldemerdash H.D. An Optimized Protocol of M2M Authentication for Internet of Things (IoT). *International Journal of Computer Network & Information Security*, 2021. № 13(2).
2. Railkar P.N., Mahalle P.N., Shinde G.R. Scalable trust management model for machine to machine communication in Internet of Things using fuzzy approach. *Turkish Journal of Computer and Mathematics Education (TURCOMAT)*, 2021. № 12(6), P. 2483-2495.
3. Salama R., Altrjman C., Al-Turjman F. An overview of the Internet of Things (IoT) and Machine to Machine (M2M) Communications. *NEU Journal for Artificial Intelligence and Internet of Things*, 2023. № 2(3).
4. Pradhan D., Tun H.M. Security challenges: M2M communication in IoT. *Journal of Electrical Engineering and Automation*, 2022. № 4(3), P. 187-199.
5. Gong X., Feng T., Albettar M. PEASE: A PUF-Based Efficient Authentication and Session Establishment Protocol for Machine-to-Machine Communication in Industrial IoT. *Electronics*, 2022. № 11(23), 3920 p.
6. Conti M., Kaliyar P., Lal, C. Secure machine to machine communication in industrial Internet of Things. *Security and Privacy Trends in the Industrial Internet of Things*, 2019. P. 199-219.
7. Sudarmani R., Venusamy K., Sivaraman S., Jayaraman P., Suriyan K., Alagarsamy M. Machine to machine communication enabled internet of things: a review. *International Journal of Reconfigurable and Embedded Systems*, 2022. № 11(2), 126 p.
8. Djehaich R., Aidel, S., Sawalmeh A., Saeed N., Alenezi A.H. Adaptive Control of IoT/M2M Devices in Smart Buildings Using Heterogeneous Wireless Networks. *IEEE Sensors Journal*, 2023. № 23(7), P. 7836-7849.
9. Mazhar M.S., Saleem Y., Almogren A., Arshad J., Jaffery M.H., Rehman A.U., Hamam H. Forensic analysis on internet of things (IoT) device using machine-to-machine (M2M) framework. *Electronics*, 2022. № 11(7), p. 1126.
10. Lara E., Aguilar L., Sanchez M.A., García J.A. Lightweight authentication protocol for M2M communications of resource-constrained devices in industrial Internet of Things. *Sensors*, 2020. № 20(2), 501 p.

11. Thota P., Kim Y. Implementation and comparison of M2M protocols for Internet of Things. In *2016 4th Intl Conf on Applied Computing and Information Technology/3rd Intl Conf on Computational Science/Intelligence and Applied Informatics/1st Intl Conf on Big Data, Cloud Computing, Data Science & Engineering (ACIT-CSII-BCD) 2016*. pp. 43-48. IEEE.
12. Rajendrakumar J.S., Thakur M. Wireless Communication for Machine-to-Machine (M2M) Connectivity in the Internet of Things (IoT). *NeuroQuantology*, 2022. № 20(17), 2273 p.
13. Pradhan D., Tun H.M. Security challenges: M2M communication in IoT. *Journal of Electrical Engineering and Automation*, 2022. № 4(3), p. 187-199.
14. Tsai W. C., Tsai T. H., Xiao G. H., Wang T. J., Lian Y. R., Huang S. H. An automatic key-update mechanism for M2M communication and IoT security enhancement. In *2020 IEEE International Conference on Smart Internet of Things (SmartIoT)* 2020. pp. 354-355. IEEE.
15. Mazhar M.S., Saleem Y., Almogren A., Arshad J., Jaffery M.H., Rehman A.U., Hamam H. Forensic analysis on internet of things (IoT) device using machine-to-machine (M2M) framework. *Electronics*, 2022. № 11(7), 1126 p.
16. Leminen S., Rajahonka M., Wendelin R., Westerlund M. Industrial internet of things business models in the machine-to-machine context. *Industrial marketing management*, 2020. № 84, p. 298-311.
17. Amaya M.O.B., Parra O.J.S., Miranda J P.R. Ontological base models machine-to-machine M2M applied to the internet of things IOT. *Revista Boletín Redipe*, 2021. № 10(12), p. 148-161.
18. Yang Y., Xie W. Composition and Communication Analysis of M2M System in Internet of Things. In *2021 International Conference on Artificial Intelligence and Electromechanical Automation (AIEA)*, 2021. pp. 113-116. IEEE.
19. Raza M.S., Zongsheng T., Muslim M.M.A. A review of human-to-machine and machine-to-machine approaches for internet of things. In *2020 International Conference on Communications, Signal Processing, and their Applications (ICCSPA)*, 2021. pp. 1-5. IEEE.
20. Kanakamedala P., Harika Y., Krishnaveni M., Nallani, B. Internet of Things (IoT) Device Investigative Analysis Using Machine-to-Machine (M2M) Framework. *International Research Journal on Advanced Science Hub*, 2023. Vol. 05, Issue 05S. p. 2582-4376. 10.47392/IRJASH.2023.S007
21. Pradhan D., Tun H.M. Security challenges: M2M communication in IoT. *J. Electr. Eng. Autom*, 2022. № 4(3), p. 187-199.
22. Patil S. Distance aware gateway placement optimization for machine-to-machine (m2m) communication in iot network. *Turkish Journal of Computer and Mathematics Education (TURCOMAT)*, 2021. № 12(2), p. 1995-2005.
23. Patil S. Distance aware gateway placement optimization for machine-to-machine (m2m) communication in iot network. *Turkish Journal of Computer and Mathematics Education (TURCOMAT)*, 2021. № 12(2), p. 1995-2005.
24. Gupt B.B., Quamara M. An overview of Internet of Things (IoT): Architectural aspects, challenges, and protocols. *Concurrency and Computation: Practice and Experience*, 2020. 32(21), 4946 p.
25. Lokhande M.P., Patil, D.D. Device classification for machine to machine communication in internet of things for tele-robotic surgery: a review. p. 618-628.
26. Itmamunafi A., Wibowo S.A., Vendyansyah N. Design and Build the LabM2M Platform as an IoT (Internet Of Things) Gateway Using Web Services. *International Journal of Computer Science and Information Technology*, 2024. № 1(1), p. 15-22.
27. Djehaiche R., Aidel S., Benhamimid K. A Smart Home Management based on M2M/IoT Technologies, 2022. p. 1-10.
28. Djehaiche R., Aidel S., Benziouche N. Design and implementation of M2M-Smart home based on Arduino-UNO. In *Artificial Intelligence and Renewables Towards an Energy Transition 4*, 2021. pp. 697-706. Springer International Publishing.
29. Ejigu MW., Santhosh J. IoT based comprehensive autonomous home automation and security system using M2M communication. *Recent Advances in Computer Science and Communications (Formerly: Recent Patents on Computer Science)*, 2021. № 14(7), p. 2234-2246.
30. Thirumaran J., Kathirvelkumaran L. Internet of Things (IoT) and Machine-to-Machine (M2M) communications. *Research Journal of Science & IT Management*, 2015. № 5(01), p. 5-10.

Sokulskyi O.Ye., Topolskov Ye.O., Zhdanova Yu.D. ANALYSIS OF INFORMATION TECHNOLOGY CAPABILITIES USING MACHINE-TO-MACHINE COMMUNICATION (M2M) FOR THE INTERNET OF THINGS

The purpose of this study is to analyse the capabilities of machine-to-machine (M2M) and Internet of Things (IoT) systems for building an integrated smart home architecture.

Theoretical and statistical research methods were used for the analysis. Statistical methods allow to determine the common relationship of input and output parameters between M2M and IoT, as well as to analyse the integration parameters of the two systems to build an integration model.

On the basis of theoretical and empirical research methods, the article analyses the possibility of integration of M2M and IoT technologies with a comparison of the purpose of each technology. It has been found that by integrating M2M communication systems with IoT devices, the integration consists of the basic ones, such as providers, Internet services, platforms and services. However, for integration, it is important to consider the underlying aspects, which consist of protocols and standards, cloud technologies, data analytics, security and safety, integration with existing systems, monitoring and management. In addition, it is also analysed that the integration of M2M with IoT combines factors to ensure it, which includes the following: ensuring communication; analytics, data collection and processing; effective resource management, security and encryption; scalability and flexibility; energy efficiency and optimisation.

The study analyses the possibility of integrating M2M with IoT to build a smart home architecture using wired and wireless networks. The main characteristics and differences between M2M and IoT are analysed, on the basis of which the architecture of a smart home was built on the example of a two-room apartment.

Based on the M2M architecture using wired and wireless technologies in Smart Home technology, the algorithm of the sequence of linking M2M equipment with IoT devices using wireless and wired networks is analysed. Applications and applications using the integration of M2M with IoT provide control of paired devices using a smartphone, where lighting, household appliances, etc. are monitored and controlled.

Key words: *machine-to-machine, Internet of Things, integration, gateway, wireless networks, smart home.*

Stelmakh N.V.

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

Mastenko I.V.

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

CLASSIFICATION AND DETECTION OF DEFECTS IN TUBULAR PRODUCTS USING MACHINE VISION

Inspection is a critical component of a production management system, involving the measurement and inspection of products to ensure that they meet required specifications and performance. Quality control standards are usually dictated by quality assurance approaches such as ISO 9001. These approaches define protocols for the manufacturing process, and quality control ensures that the required tasks are performed. In a manufacturing environment, businesses can perform various types of quality control, including material inspection, in-process inspection, and final inspection. By performing these checks, you can ensure that quality control is on the right track, resulting in lower costs and increased efficiency. Implementing quality control best practices can improve quality control. The key ingredients for success in building a quality control system are automation, inspection, and tracking.

Non-automated visual inspection, which is still used in many enterprises, has a number of disadvantages, namely subjectivity and low reliability, as well as low performance on complex products with fine topology. According to the operators, inspection of complex products using simple optical devices is very stressful on their eyes, which is probably a danger to their health.

The growing interest in computer vision technology is due to the non-contact method of control, high accuracy and productivity, at a relatively low cost

The paper considers the problem of controlling the output characteristics of finished products, which is proposed to be solved using computer vision methods, and proposes a mathematical description of one type of defect using the Hough transform, which is successfully used to describe and detect objects of round shape.

Also, the paper analyses the most typical defects for the object of control of a tubular body and proposes a classification of these defects by grades for further use in training a neural network.

Key words: *product defect, quality management, automated production, quality control, machine vision, neural networks.*

Formulation of the problem. One of the most important aspects of product quality management in the instrumentation industry is testing and all types of control. Specialised research laboratories and technical facilities allow us to test and inspect products for compliance with specifications and standards. This includes testing at least for reliability, accuracy, and other characteristics. Automation of quality management processes is also becoming more and more practical in the instrumentation industry. The use of special software for monitoring and analysing data helps to reduce the human factor, increase productivity and improve the accuracy of quality control. Modern technologies, such as machine learning and the Internet of Things (IoT), also have applications in quality management in instrumentation. For example, IoT devices can collect data on the operation of devices in real time, and machine learning algorithms can predict potential failures and perform preventive maintenance [1].

The use of computer vision techniques is rapidly expanding to cover all spectrums of production technology. The task to be solved includes the initial quality control of tubular products, which are naturally occurring objects and include a variety of criteria for control, which greatly complicates the task of initial quality control. Defects such as stains and microcracks are not critical to the functionality of the object of study, but directly affect the appearance of the product and the quality control process. The main classification is based on the shape, size, type of defect and its location.

To assess the external condition of product elements, either visual inspection of the structure or analysis of images taken with digital cameras is usually used. Non-automated visual inspection, which is still used at many enterprises, has a number of disadvantages that prevent its use in modern conditions [2]. The main negative aspects in this case are

subjectivity and low reliability, as well as low performance on complex products with a thin topology. According to the operators, inspection of complex products using simple optical devices refines their vision too much, which is probably dangerous for their health [3].

Analysis of recent research and publications.

Today, significant experience has already been gained in the use of machine vision to solve various problems in production processes, the results of which are presented in the works of domestic and foreign researchers. For example, Nandini et al. in [4] extensively discuss the application of machine vision technologies in various industries, such as the food industry, textile industry, and printed circuit board industry. The team of researchers proposes to improve the methods of output quality control by analysing images of finished products. Their research demonstrates an improvement in results compared to manual inspection of products.

Paper [5] presents a comprehensive view and the important role of computer vision as a key advanced technology in the materialisation of various global visions of a new generation of ICT solutions in manufacturing and industry in general. The authors position visual computing as a key role for Industrie 4.0 and provide a general and broad overview with specific directions and scenarios for future research. The visual computing research community will have exciting new areas of research to address the challenges of the next industrial revolution.

The authors' research [6] demonstrates the positive impact of the introduction of continuous quality control, technologies and approaches used in Industry 4.0. They argue that it is important to conduct further applied research, not to stop at the results obtained, in order to obtain statistical data that can be processed in real time.

In article [7], the authors demonstrated the tendency of transition from manual visual inspection to computer vision. The advantage of machine vision as a non-destructive method is given. It was used for external determination and showed an increase in product quality and its efficiency, objectivity, consistency and reliability. Machine vision systems used to measure size, shape and colour are described, including improvements in cameras, lighting settings, image processing and analysis methods, and experimental results. In addition, the advantages and disadvantages of machine vision systems are outlined with recommendations for future developments.

For visual product inspection tasks, the use of deep learning solutions is increasingly being adopted.

However, new data and product-specific considerations are still required to solve each specific problem. Study [8] proposes a method inspired by class activation maps (CAM) to improve deep neural network-based image classification algorithms. image classification algorithms by creating an attention map that marks the defective area.

As can be seen from the above examples of research by scientists, computer vision technology is an important feature of modern production in ensuring product quality, as such systems can check for defects faster and more accurately than humans.

Purpose and task statement. The aim of the study is to analyse and classify defects in tubular products and, on its basis, to develop a set of product quality criteria for further processing by a machine vision system that will allow detecting product defects with a given probability and sorting them according to the proposed classes.

Presentation of the main research material.

Computer vision methods for outbound quality control are widely used due to their efficiency and objective results compared to human inspection. But, on the other hand, in some cases, a major drawback is that the development of such systems is time-consuming. Hence the desire to find new, fast and reliable solutions [9].

For quality control of tubular products, the advantage is that the body can be viewed on the basis of a cylinder and divided into independent zones, allowing for parallel output inspection. One of these zones is the end part. The main task is to correctly identify and classify defects.

Thus, when classifying defects by shape, three main cases are distinguished (Fig. 1): a) defects of regular shape, oval, close to cylindrical or spherical, without sharp edges; b) defects of lentil shape, with sharp edges; c) defects of arbitrary, indefinite shape, with sharp edges – cracks, tears, foreign inclusions Fig. 1.

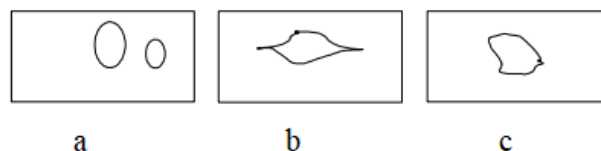


Fig. 1. Classification of defects by shape: a – regular shape; b – lentil-like shape with sharp edges; c – arbitrary, indefinite shape with sharp edges

When classifying defects by location, four cases are distinguished Fig. 2: a – surface defects located on the surface of a material, semi-finished product or article – cracks, dents, foreign inclusions; b – sub-sur-

face defects – defects located under the surface of the controlled article, but near the surface itself; c – volumetric defects – defects located inside the article. For example, the presence of phosphide and nitride inclusions and layers can lead to the formation of defects of the fourth type – through defects.

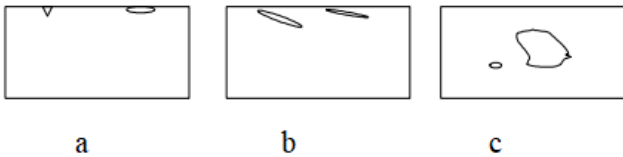


Fig. 2. Classification of defects by position in the controlled object: a – surface; b – sub-surface; c – volumetric

According to the shape of the cross-section, through defects are round (pores, slag inclusions) and slit-shaped (cracks, structural defects, discontinuities in the location of oxide and other inclusions and layers). According to the size of the effective diameter or width of the opening (for cracks and crevices), through defects are divided into ordinary (> 0.5 mm), microcapillary ($0.5 \dots 4 \cdot 2 \cdot 10$ mm) and microcapillary ($< 4 \cdot 2 \cdot 10 \cdot \times$ mm) defects [10].

As an object of control, let's consider a beverage tube, which is a complex-shaped product for initial inspection by computer vision. It has several surfaces, which can be considered as a side surface, which takes the form of a rectangle when expanded, and an end face, which takes the form of an isosceles trapezoid when expanded Fig. 3.



Fig. 3. Object of control reed tube

In this paper, we will consider the end part of a reed tube, which is geometrically characterised by the inner and outer diameters; among the permissible defects, we can distinguish an end crack and a neoplasm in the middle of the product Fig. 4.

As a first step, according to the Hough transform technique, which is the most suitable and widely used method among the methods for detecting round



Fig. 4. End part of the reed tube

shapes, we determine the centre of the tube to determine the inner and outer diameters, which will also give an understanding of the still unknown coordinates of the product centre (x_0, y_0), as well as the outer and inner diameters as r_1 and r_2 , respectively.

Using the circular Hough transform method again, but reducing the search area, we check the product for neoplasms, since they are mostly not dense and have a gap, so we can distinguish among them a circle using the Hough transform Fig. 5.

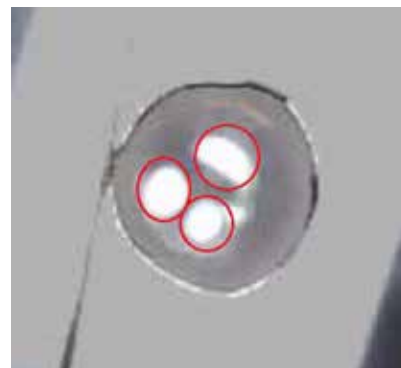


Fig. 5. End part of a reed tube with a defect

The detection of neoplasms is performed in the plane bounded by the radius r_2 found at the previous stage. After the Hough inspection operations, the reed tube is checked in several successive stages, and if at least one of them shows deviations from the specified parameters, this control object, i.e. the product, will be sorted or rejected.

The first step is to pre-process the image and isolate all external factors. The second step is to transform the circle area into a plane, for which we denote the outer and inner diameters as r_1 and r_2 , respectively.

The next step is to expand the circle area to create a rectangular area to simplify information processing. The perimeter of the circle with radius r will be $2\pi r$, since we have $r_1 > r_2$, so $2\pi r_1 > 2\pi r_2$. The area of

our circle with diameters r_1 and r_2 in the expanded view will take the form of an isosceles trapezoid with aspect ratios of r_1/r_2 . Working with the shape in this way, important pixels are lost, which affects the final result, so the best option is to solve the matrix as $2\pi r_1$ and add the missing pixels by duplicating the neighbouring ones. Note that the number of missing pixels is proportional to the ratio r_1/r_2 .






Using the initial data, we unfold the circle to obtain a rectangular matrix with a height of r_1-r_2+1 and a length of $2\pi r_1$. The unwrapping process can be represented as a transformation from the polar coordinate system to the Cartesian coordinate system. Let's introduce new values (x_c, y_c) as the coordinates of the centre of the circle in Fig. 6. Each pixel in the



Fig. 6. End part of the reed tube with parameters

Table 1

Classification of the most typical defects of the object of control and their correspondence to the class

Type of defect	Type of defect	Type of defect	Type of defect
Pigmentation		Explicit, corrective; Insignificant; Superficial defect;	Chemical treatment 1 Grade, 2 Grade
Colour		Explicit, corrective; Insignificant; Superficial defect;	Chemical treatment 1 Grade, 2 Grade
Cutting defects (chipped ends)		Explicit, incorrigible; Critical; Superficial defect;	Waste
The presence of a film inside		Explicit, incorrigible; Minor defect; large-scale defect;	Mechanical modification
Cracks		Manifest, irreparable; Significant; Superficial defect;	Waste
Compliance with sealing parameters (product length L, outer diameter D, inner diameter d)		Explicit, corrective; Significant; Superficial defect;	1 Sort S 1 Sort M 1 Sort L 1 Sort XL 2 Sort S 2 Sort M 2 Sort L 2 Sort XL

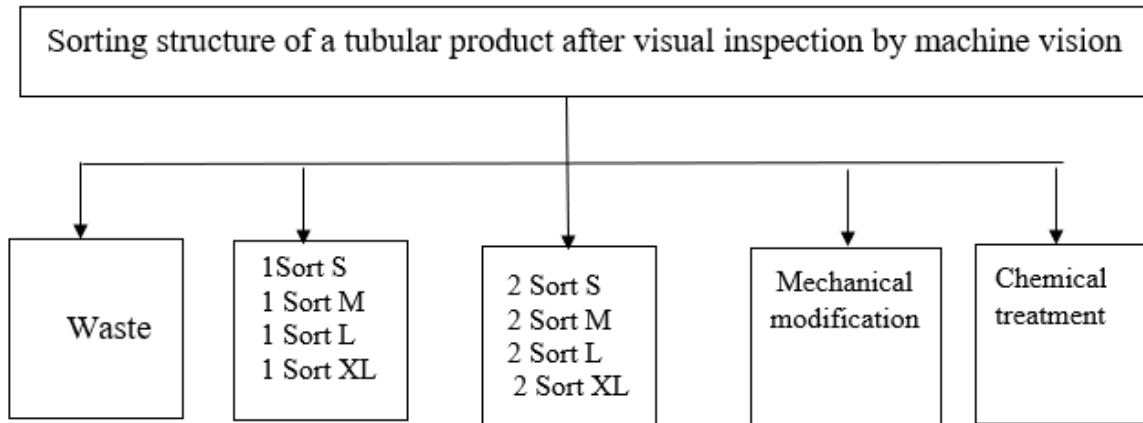


Fig. 7. Product sorting structure according to defect classes

polar coordinate system is represented by a radius r and an angle θ [11].

The transition system can be represented as follows:

$$\begin{cases} x = x_c + r * \cos(\theta) \\ y = y_c + r * \sin(\theta) \end{cases}$$

where (x, y) are the Cartesian coordinates of the corresponding polar coordinates (r, θ) .

Having analysed the object of control in accordance with the considered possible defects (Figs. 1, 2), we have developed a classification of the most typical product defects and introduced the concept of defect class Table 1.

Thus, according to the proposed classification of the most characteristic defects of the object of inspection and their compliance with the class, the sorting structure of a tubular product after visual inspection by means of machine vision can be presented as follows Fig. 7.

Based on the results of the classification in Table 1, the following criteria give us the following results:

Pigmentation is not a critical defect, therefore, depending on the percentage of contamination, it can be corrected by washing in a chemical solution and subsequently classified as grade 1 or 2.

Similarly, considering the colour of the object of control, we divide the products into grade 1 or 2.

If there is a cutting defect or a crack on a tubular product, it is rejected.

If there is a film in the middle, the product is assigned a separate grade, and all these products with a defect are sent for revision by mechanical and then chemical methods for better results and are re-inspected.

The last important defect is the conformity of geometric parameters; if there are any curved or bent products, they are rejected. At the same time, the diameters of the products are analysed and allocated to the appropriate size.

Conclusions. The paper considers the problems of controlling the output characteristics of finished products and proposes a classification and criteria for determining defects in the future using computer vision, namely the use of optical cameras will allow to obtain images that clearly show the colour gradient, geometric shape, and internal state of the objects under control. The most typical defects for a tubular product were analysed, which made it possible to classify them accordingly and select the most rational mathematical apparatus for their description.

The work has several directions for continuation, namely, it is necessary to implement a procedure for sorting tubular objects based on the proposed classes, i.e., detecting by a neural network the presence or absence of defects on them, colour and diameter according to the proposed classes of defects. It is also necessary to develop a segmentation method that will help, in addition to detecting the defect, to track its changes and parameters in the overall product quality management system.

It is planned that the developed system of output control by computer vision may be of interest to organisations and contribute to the automation of their output or intermediate quality control by computer vision, which will allow production to exercise full control over the conveyor production process and reduce the likelihood of rejects.

Bibliography:

1. Antony, J., Sony, M., Furterer, S., McDermott, O., & Pepper, M. Quality 4.0 and its impact on organizational performance: an integrative. The TQM Journal. 2022. 34(6). P. 2069-2084.

2. Bahria N. et al. Maintenance and quality control integrated strategy for manufacturing systems. *European Journal of Industrial Engineering*. 2018. 12. 3. P. 307-331.
3. N. Stelmakh, I. Mastenko, O. Sulima, & T. Rudyk, "Features of the implementation of computer vision in the problems of automated product quality control", *Informatyka, Automatyka, Pomiarы W Gospodarce I Ochronie Środowiska*, 2023. 13(1), pp. 38-41, DOI: 10.35784/iapgos.3434
4. V. Nandini, R. Deepak Vishal, C. Arun Prakash, S. Aishwarya. A Review on Applications of Machine Vision Systems in Industries, *Indian Journal of Science and Technology*. 9 (2016). 5. J. Posada, C. Toro, I. Barandiaran, D. Oyarzun, D. Stricker, R. De Amicis, E.B. Pinto, P. Eisert, J. Döllner, I. Vallarino. Visual Computing as a Key Enabling Technology for Industrie 4.0 and Industrial Internet, *IEEE Computer Graphics and Applications*. 35 (2015) P. 26–40.
6. S.S. A Sader, P. István Husty, M. Daróczy. Suggested indicators to measure the impact of industry 4.0 on total quality management, n.d. <https://stumejournals.com/journals/i4/2017/6/298/pdf> (accessed November 9, 2018).
7. H. Hong, X. Yang, Z. You, F. Cheng. Visual quality detection of aquatic products using machine vision, *Aquacultural Engineering*. 63 (2014) P. 62–71.
8. Rytis Augustauskas, Lukas Zabulis, Arūnas Lipnickas, Simas Jokubauskas. Defects Localization in Images Using Deep Learning-Based Classification with CAM Output. 12th International Conference on Intelligent Data Acquisition and Advanced Computing Systems: Technology and Applications (IDAACS) 2023 IEEE. <https://doi.org/10.1109/IDAACS58523.2023.10348813>
9. Feng, Q., Kapur, K.C. (2008). Quality Engineering: Control, Design and Optimization. In: Misra, K.B. (eds) *Handbook of Performability Engineering*. Springer, London. https://doi.org/10.1007/978-1-84800-131-2_13
10. Guo Y. et al.: Rotational projection statistics for 3D local surface description and object recognition. *International journal of computer vision* 2013. 105(1), P. 63–86.
11. Ballard D. H. Generalizing the Hough Transform to Detect Arbitrary Shapes. *Pattern Recognition*. 1981. V. 4(2). P. 111–122.

Стельмах Н.В., Мастенко І.В. АНАЛІЗ ТА КЛАСИФІКАЦІЯ ВИЯВЛЕННЯ ДЕФЕКТІВ ВИРОБІВ ТРУБЧАСТОЇ ФОРМИ ЗАСОБАМИ МАШИННОГО ЗОРУ

Контроль є найважливішим компонентом системи управління виробництвом, що включає вимірювання та перевірки виробів, щоб переконатися, що вони відповідають необхідним специфікаціям та технічним характеристикам. Стандарти контролю якості зазвичай диктуються підходами до забезпечення якості, як-от ISO 9001. Ці підходи визначають протоколи для виробничого процесу, а контроль якості забезпечує виконання необхідних завдань. У виробничому середовищі підприємства можуть здійснювати різні види контролю якості, включаючи перевірку матеріалів, перевірку у процесі виробництва та остаточну перевірку. Виконуючи ці перевірки, можна переконатися, що контроль якості знаходиться на правильному шляху, що призводить до зниження витрат, підвищення ефективності. Впровадження найкращих практик контролю якості може покращити контроль якості. Головні складові успіху при формуванні системи контролю якості: автоматизація, огляд, відстеження.

Неавтоматизований візуальний контроль, який до цих пір використовується на багатьох підприємствах має ряд недоліків, а саме суб'єктивність і низька достовірність, а також мала продуктивність на складних виробках з тонкою топологією. Контроль складних виробів із застосуванням простих оптичних пристосувань, за словами операторів, дуже сильно напружує зір, що, напевно, становить небезпеку для їх здоров'я.

Зростаюча зацікавленість до технології комп'ютерного бачення зумовлена, безконтактним методом контролю, високою точністю та продуктивністю, за відносно низьку вартість

***В роботі розглянуто** проблематику контролю вихідних характеристик готової продукції, яку пропонується вирішити використанням методів комп'ютерного зору та запропоновано математичний опис одного з видів дефектів застосувавши перетворення Хафа, яке успішно використовується для опису та виявлення об'єктів круглої форми.*

Також в роботі проаналізовано найбільш типові дефекти для об'єкту контролю тіла трубчастої форми та запропоновано класифікацію цих дефектів по сортам для подальшого застосування при навчанні нейронної мережі.

***Ключові слова:** дефект виробу, керування якістю, автоматизоване виробництво, контроль якості, машинний зір, нейронні мережі.*

Стешенко Я.В.

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

Протасов А.Г.

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

АВТОМАТИЗАЦІЯ ТЕХНОЛОГІЧНИХ ПРОЦЕСІВ ФОРМУВАННЯ АСФАЛЬТНО-БЕТОННИХ ПОКРИТТІВ

У статті проводиться аналіз технологій формування дорожніх асфальтобетонних покриттів. Сучасний стан цієї галузі вказує на необхідність проведення масштабних досліджень для підвищення якості та довговічності асфальтобетонних покриттів, а також для автоматизованого моніторингу будівництва доріг. Увага концентрується на головній складовій технологічного процесу укладання асфальтної суміші – підігріві під час укладання. Встановлено, що найбільш популярні серед будівельників технології можна умовно поділити на три групи. Перша це інфрачервоні обігрівачі, друга – нагрівачі на гарячому маслі, парові і непрямого вогню та третя – електричні обігрівачі. У статті розглядаються недоліки цих способів, які обмежують їх використання. Суттєвим недоліком інфрачервоних обігрівачів є наявність у складі їх обладнання газових балонів, що працюють під високим тиском. Найбільш перспективними є електричні обігрівачі. Сьогодні, такі електричні обігрівачі, як індукційні та мікрохвильові показали свою ефективність при ремонті асфальтного покриття з тріщинами за рахунок підвищення температури нагрівання суміші, що в дорожній техніці називається загоєнням. Електричні обігрівачі належать до інноваційних технологій. До проблем в дорожньому будівництві також відноситься рівномірність ущільнення та контролю температури гарячої асфальтобетонної суміші. Результати дослідження показали, що тепловізійне зображення, особливо з використанням інфрачервоної технології, може зробити значний внесок у контроль якості процесів укладання та ущільнення асфальтобетону. Проблема мінливості якості асфальту через вплив різних параметрів може бути вирішена завдяки впровадженню автоматизованої системи управління процесом у реальному часі, яка би забезпечувала бригади асфальтоукладачів миттєвими даними для посиленого контролю процесу під час будівництва.

Ключові слова: діагностика дорожнього покриття, автоматизація технології покриття, управління процесом укладання покриття.

Постановка проблеми. Логістична система автомобільних доріг є одним з основних об'єктів критичної інфраструктури будь-якої країни у тому числі і в Україні. Будівництво та відновлення автомобільних доріг є дуже витратною статтею економіки нашої країни. Під впливом великого навантаження дорожнє покриття схильне до зносу та старіння і потребує ремонту. Задля зниження витрат на ремонт проводиться автоматизація процесу нанесення дорожнього покриття і його діагностика. Ефективна система керування процесом підготовки і нанесення дорожнього покриття з контролем всіх технологічних вимог здатна зменшити витрати на ремонті більше ніж втричі. Існує проблема мінливості якості асфальту через вплив різних параметрів, таких як температура шару асфальту, кількість проходів катка, наявність вантажівок

з асфальтобетонною сумішшю та час доставки асфальтобетонної суміші. Сучасний стан цієї галузі вказує на необхідність проведення масштабних досліджень для підвищення якості та довговічності асфальтобетонних покриттів, а також для моніторингу будівництва доріг. Автоматизація процесу нанесення дорожнього покриття та його діагностика можуть значно зменшити витрати на ремонті, що робить цю тему актуальною для подальшого дослідження та впровадження.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Метою останніх досліджень стало пошук рішення, яке сприятиме покращенню управління процесом під час будівництва асфальтобетонного покриття шляхом розробки системи з високим рівнем гнучкості, наданням даних у реальному часі та інтеграцією з іншими системами.

Процес укладання асфальту пов'язаний зі складною технологією, яка охоплює кілька етапів, включаючи підготовку земляного полотна, нанесення шарів основи та остаточне укладання асфальтового покриття.

Головним етапом цієї технології є власне укладання асфальтного покриття. За допомогою асфальтоукладальника гарячу асфальтобетонну суміш рівномірно наносять на заздалегідь підготовлену поверхню. Гаряча суміш являє собою суміш асфальтної основи та в'язучих заповнювачів, які нагріваються до високих температур для забезпечення належного ущільнення та зчеплення з нижчими шарами. Після укладання асфальту проводиться його ущільнення важкими катками для досягнення потрібної щільності та гладкості (рис. 1).



Рис. 1. Процес укладання асфальтного покриття [1]

Температура гарячого асфальтобетону є критичним компонентом для ущільнення та довговічності залитого покриття. Ідеальна температура для гарячого асфальтобетонного покриття становить від 135°C до 149°C [2]. Таку температуру необхідно підтримувати протягом всього періоду транспортування суміші від заводу виробника до об'єкту, інакше вантаж буде вважатися непридатним для подальшого застосування.

При температурі нижче $76,7^{\circ}\text{C}$ асфальт стає жорстким та схильним до передчасного руйнування [2], що становить проблему для довговічності і стабільності асфальтобетонних покриттів. Такі характеристики асфальту, як жорсткість і низька щільність, можуть призвести до утворення в покритті тріщин та інших деформацій під час експлуатації, особливо в умовах низьких температур.

Деформації та тріщини в структурі асфальтобетонного покриття можуть мати негативний вплив на безпеку руху, ефективність руху та економічні витрати на утримання та ремонт доріг.

Тому детальне вивчення цієї проблеми є важливим для розробки стратегій підвищення стабільності та довговічності асфальтобетонних покриттів в умовах низьких температур і запобігання їх передчасному зносу.

Загалом, технологія укладання асфальту відіграє важливу роль у розвитку та обслуговуванні інфраструктури, забезпечуючи довговічні та економічно ефективні рішення для різних логістичних потреб.

Постановка завдання. Метою статті є аналіз автоматизованих технологій формування асфальтобетонних покриттів дорожнього покриття та визначення напрямку подальшого розвитку цих технологій.

Виклад основного матеріалу. Головною складовою технологічного процесу укладання асфальтної суміші є її підігрів під час укладання. Від технології нагрівання асфальту залежить його здатність змішуватися та з'єднуватися з наповнювачем, що в кінцевому результаті впливає на якість покриття.

1. Технології підігріву асфальту при укладанні.

Для підігріву асфальту під час укладання використовується кілька технологій, кожна з яких має свої переваги та застосування. Найбільш популярні серед будівельників технології можна умовно поділити на три групи. Перша це інфрачервоні обігрівачі, друга – нагрівачі на гарячому маслі, парові і непрямого вогню та третя – електричні обігрівачі.

Інфрачервоні обігрівачі використовують для нагрівання поверхні асфальту інфрачервоним випромінюванням, яке проникає в середину суміші і нагріває її зсередини [3]. Обладнання таких обігрівачів складається з інфрачервоних нагрівальних елементів, які живляться природним газом або пропаном [4]. Технологію інфрачервоних обігрівачів застосовують для ремонту пошкоджених ділянок – вибоїн і тріщин, які мають невелику площу. До переваг такого способу нагріву можна віднести здатність прогрівати лише необхідну ділянку, а не всю поверхню покриття [5]. До недоліків цього способу, що обмежує його використання, належить вплив вітру і температури навколишнього середовища, які можуть значно підвищити час нагріву суміші і зменшити час її придатності до ремонту. Також, використання інфрачервоних обігрівачів обмежено у зоні розташування каналізаційних і дренажних систем. Згідно вимогам багатьох державних та місцевих правил опалення поблизу таких систем забороняється [6]. Суттєвим недоліком інфрачервоних

обігрівачів є наявність у складі їх обладнання газових балонів, що працюють під високим тиском. Цей фактор вимагає особливої кваліфікації у обслуговуючого персоналу по роботі з обладнанням підвищеної безпеки [7].

Другу групу нагрівачів об'єднує технологія попереднього нагріву теплоносія, який потім циркулює через теплообмінник, що спрямований на асфальтну поверхню для її розігріву. В нагрівачах на гарячому маслі в якості теплоносія використовується термальна олія, парові нагрівачі застосовують пару як теплоносій, теплоносієм також може слугувати і повітря. Всі ці системи нагріву належать до обігрівачів непрямого вогню. Метод непрямого нагрівання допомагає запобігти прямому контакту полум'я з асфальтом.

Нагрівачі на гарячому маслі часто використовуються у великомасштабних проектах укладання асфальту завдяки їхній здатності забезпечувати контрольований нагрів на великій площі. Температура гарячої олії в таких нагрівачах ретельно контролюється [8]. Використання масляних обігрівачів дає ряд переваг, ці нагрівачі можуть працювати при високих температурах, не викликаючи деградації асфальту. Найбільш поширеним масляним нагрівачем серед подібного обладнання є нагрівач з газовим пальником, який дає необхідну для процесу високу температуру, близько 270°C [9]. Основна перевага термічного нагріву рідини полягає в тому, що він забезпечує як високу температуру, так і низький тиск, що є безпечним варіантом для промислових процесів нагрівання [10, 11].

Недоліком такої системи нагріву асфальту є втрата тепла в димоходах, що робить систему опалення на маслі не ефективною. В роботі [12] авторами запропоновано методику розрахунку ефективності нагріву, яка базується на типовому обігрівачі, який має 20% надлишку повітря та температуру навколишнього середовища 21,1°C. Вплив системи димових газів на ефективність опалення пропонується визначати через

температуру димової труби та використання наданих графіків.

Парові нагрівачі використовують пару як теплоносій для нагрівання асфальтового матеріалу. Пара циркулює через мережу труб, які безпосередньо контактують з асфальтом, ефективно передаючи тепло матеріалу. Парові нагрівачі забезпечують рівномірний нагрів і часто використовуються в випадках, коли потрібен точний контроль температури [13].

Електричні обігрівачі є екологічно чистим варіантом підігріву асфальту під час укладання. Для виробництва тепла ці обігрівачі використовують електроенергію і не потребують викопного палива чи інших горючих матеріалів. Сьогодні, такі електричні обігрівачі, як індукційні та мікрохвильові показали свою ефективність при ремонті асфальтного покриття з тріщинами за рахунок підвищення температури нагрівання суміші, що в дорожній техніці називається загоєнням. Вони належать до інноваційних технологій в дорожньому будівництві [14, 15, 16].

2. Технологія індукційного та мікрохвильового нагріву асфальтобетону.

Проблему індукційного нагріву асфальтобетону розглянуто у роботі [17]. Індукційне загоєння асфальтобетонних сумішей здійснюється за рахунок впливу зовнішнього електромагнітного випромінювання, яке діє на пошкоджену ділянку покриття. На рис. 2 показано процес індукційного нагріву асфальтобетонної суміші з наступним розсіюванням енергії у навколишнє середовище.

Плинність та здатність асфальтових в'язучих складових до заповнення тріщин відіграють ключову роль у характеристиках індукційного загоєння. Автори роботи пропонують енергетичний підхід до вивчення особливостей індукційного нагріву асфальтобетону, який може бути використаний для інженерних застосувань дорожніх покриттів.

Для проведення своїх досліджень автори використовували зразки асфальтобетону різних роз-

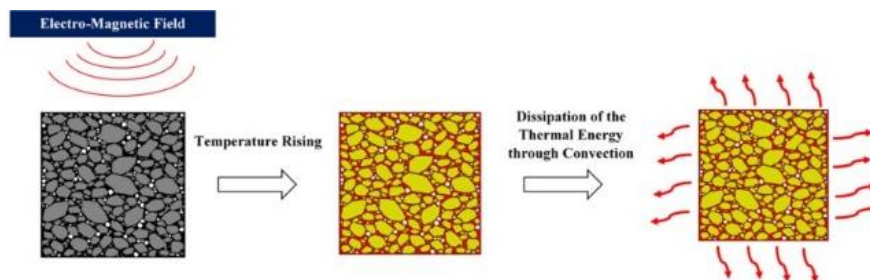


Рис. 2. Нагрів та охолодження асфальтної суміші при індукційному нагріву [17]

мірів, з різними типами заповнювачів та електропровідних модифікаторів. Було оцінено здатність асфальтобетону до індукційного нагріву на основі залежності температури поверхні зразка від часу на етапі індукційного нагріву.

Автори виявили, що використання температури поверхні зразків асфальту під час процесу нагрівання не може належним чином описати процес індукційного нагрівання в зразку асфальту, оскільки температура поверхні під час процесу нагрівання не може враховувати розподіл і величину внутрішньої енергії. Автори змогли запропонувати точний і енергетично обґрунтований підхід до вивчення особливостей індукційного нагріву асфальтобетону під впливом електромагнітного поля, а також показали вплив розмірів зразка на індукційний нагрів. Однак автори не проводили польових експериментів для перевірки запропонованого ними підходу, що може обмежити використання їхньої роботи. Крім того, запропонований підхід може вимагати більш складного і дорожчого обладнання в порівнянні з широко використовуваним методом поверхневої температури. Результати експериментів підтвердили, що розподіл електромагнітного поля та теплової енергії всередині асфальтобетону залежить від розміру зразка, що призводить до неточної характеристики індукційного загоєння.

Дослідження, проведені авторами робіт [18, 19], показали, що матеріали на основі вуглецю, такі як технічний вуглець та активоване вугілля, а також волокна сталеві вати є ефективними провідними добавками, які забезпечують достатню чутливість до електромагнітного поля при індукційному нагріві, що підвищує температуру та здатність до індукційного загоєння.

У дослідженні [20] вивчається кореляція між затвердінням асфальтобетону, викликаним індукційним нагріванням, і реологічними (деформаційними) властивостями асфальтової в'язучої компоненти. Розмір асфальтобетону та реологічні властивості розглядалися як вирішальні параметри здатності індукційного нагріву відновлювати ушкодження. Щоб оцінити взаємозв'язок між реологічними властивостями асфальтової в'язучої компоненти та здатністю до відновлення асфальтобетону, спочатку були досліджені реологічні властивості компоненти, потім були оцінені електропровідність і лікувальні властивості зразків асфальтобетону, викликаних індукційним нагріванням.

Основна мета дослідження [21] полягала у вивченні впливу ступеня старіння на характерис-

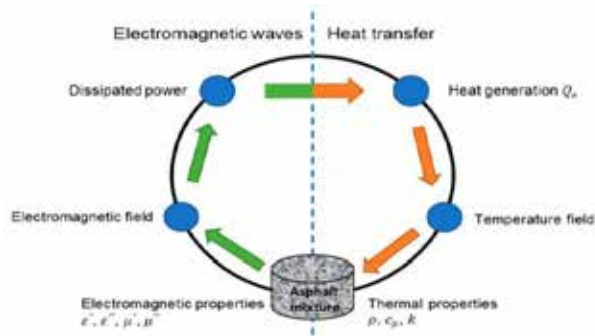
тики індукційного нагрівання та загоєння асфальтових сумішей, що зазнають впливу зовнішнього електромагнітного поля. Авторами було проведено моделювання довгострокового старіння, оскільки це надзвичайно складне явище, оскільки процес старіння в польових умовах відбувається за температури навколишнього середовища, відбувається дуже повільно і займає багато часу. Результати показують, що зістарені зразки демонструють електропровідну поведінку, їх питомий електричний опір збільшується зі збільшенням рівня старіння, а найменший електроопір спостерігається у не постарілих сумішей.

У статті [22] представлено оцінку можливого використання техніки мікрохвильового нагріву під час утворення поздовжніх швів та процесу ремонту потрісканого асфальтового покриття. Одним з неодмінних етапів процесу укладання і ущільнення асфальту є формування поздовжніх і поперечних швів [23, 24]. Результати досліджень показали, що з'єднання, створені за допомогою мікрохвильового нагрівання мають кращі характеристики розтягування у порівнянні з іншими методами. Під час дослідницького експерименту авторами було загоєно асфальтне покриття на повну глибину 10 см за допомогою однієї операції загоєння, тому автори вважають, що мікрохвильові методи лікування тріщин мають великий потенціал.

Для дослідження механізму мікрохвильового нагріву асфальтобетонної суміші, тобто зв'язку електромагнітного і теплового полів (рис. 3а), в роботі [25] було проведено чисельне моделювання цього процесу, а результати порівнювались з експериментальними випробуваннями. Авторами було розроблено чисельні імітаційні моделі мікрохвильового нагрівання асфальтобетонної суміші за допомогою кінцево-елементного програмного забезпечення COMSOL Multiphysics. Основні вхідні теплові та електромагнітні параметри для моделі були виміряні в лабораторії шляхом експериментальних досліджень. Зразки асфальтобетонної суміші автори нагрівали за допомогою мікрохвильової печі протягом різного часу (рис. 3б).

Результати чисельного моделювання в цій роботі добре корелюють з результатами лабораторних випробувань. Розроблена модель зв'язку електромагнітних хвиль з теплообміном може бути використана для моделювання процесу мікрохвильового нагріву асфальтобетонної суміші.

Нагрівальні характеристики та ефективність індукційного та мікрохвильового загоєння



(a)



(б)

Рис. 3. (3а) – блок-схема зв'язку електромагнітного і теплового полів;
(3б) – нагрів зразків за допомогою мікрохвильової печі [25]

асфальтової суміші були досліджені в роботі [26]. За результатами порівняння двох методів нагріву, автори прийшли до висновку, що при індукційному нагріві суміші з'являється явище градієнта – різниця температури між поверхнею і дном зразка, яка зростає з часом нагрівання. Це явище призвело до того, що верхня частина дослідного зразка зажила набагато краще, ніж нижня. В той же час мікрохвильове нагрівання є відносно рівномірним у поздовжньому розподілі і рівномірність нагрівання не залежить від часу нагрівання, що сприяє більш рівномірному загоєнню тріщин в асфальтовій суміші. У підсумку автори зазначають, що при однаковій потужності та однаковому способі випромінювання індукційне нагрівання відбувається швидко та неоднорідно в поздовжньому напрямку, тоді як мікрохвильове нагрівання відбувається повільно та рівномірно. Ефективна глибина нагрівання при мікрохвильовому нагріванні набагато вища, ніж при індукційному нагріванні.

3. Проблема рівномірного ущільнення та контролю температури.

Проблема досягнення рівномірного ущільнення та контролю температури гарячої асфальтобетонної суміші (ГАС) розглядається у роботі [27]. Свої дослідження автори проводили при моніторингу ключових параметрів процесу укладання ГАС, включаючи дані про температуру ГАС, погодні умови, дані про рух обладнання та показники щільності шару. У випробуваннях використовувалося різне обладнання для вимірювання температури, а саме: ручні інфрачервоні камери, стаціонарні промислові інфрачервоні камери та автоматизовані інфрачервоні лінійні сканери.

Результати дослідження показали, що тепло-візійне зображення, особливо з використанням інфрачервоні технології, може зробити значний

внесок у контроль якості процесів укладання та ущільнення асфальтобетону.

Автори запропонували вирішення проблеми покращення моніторингу температури під час укладання та ущільнення асфальтобетонного покриття. Однак, зосередженість дослідження на безпосередніх експлуатаційних перевагах моніторингу температури залишає місце для подальших досліджень довгострокових експлуатаційних характеристик і довговічності збудованих покриттів.

В роботі [28] розглядається критично важлива проблема різниці температур в асфальтобетонних покриттях з гарячої суміші, яка може призвести до сегрегації і передчасного руйнування дорожнього покриття. Автори провели дослідження з використанням інфрачервоні камери для аналізу температурних коливань у гарячій асфальтобетонній суміші (рис. 4), що вивантажується з вантажівок, а також випробування на ядерну щільність, відбір кернів і візуальний огляд для оцінки однорідності покриття. Було виявлено, що значні температурні перепади можуть призвести до нерівномірної

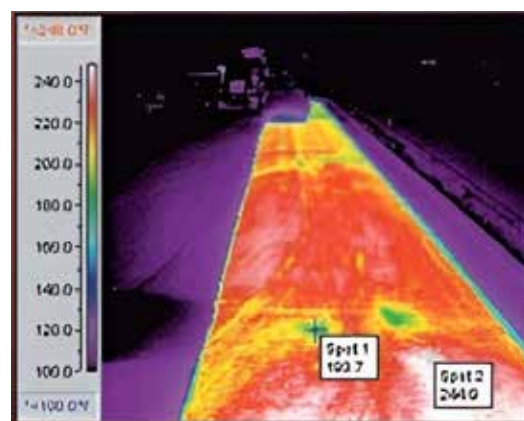


Рис. 4. Температурний профіль після укладки асфальту [28]

щільності і пошкоджених ділянок покриття, що підкреслює важливість реміксування перед укладанням для досягнення більш гладких і довговічних доріг.

Mahoney Joe P. та ін. [29] також вивчали питання температурних перепадів в асфальтобетонному покритті під час будівництва та їх вплив на якість покриття.

Проаналізувавши дані з 13 парних зразків асфальтобетонного покриття, автори виявили кореляцію між холоднішими ділянками покриття, більшою кількістю повітряних пустот і потенційним скороченням терміну служби покриття. Вони використовували градацію та аналіз вмісту асфальту, а також ручні цифрові датчики та інфрачервону камеру, щоб оцінити температурні перепади та їхній вплив на експлуатаційні характеристики покриття. Хоча дослідження успішно пов'язало температурні перепади з більшою кількістю повітряних пустот у прохолодних ділянках покриття, воно не заглиблювалося в конкретні механізми, що спричиняють ці перепади.

Крім того, не було детально вивчено довгостроковий вплив різниці температур на експлуатаційні характеристики дорожніх покриттів зі змінним струмом. Дослідження підкреслює важливість врахування температурних перепадів під час будівництва для досягнення оптимальної щільності та покращення якості дорожнього одягу.

У висновках автори підкреслюють важливість врахування температурних перепадів у будівельній практиці для пом'якшення потенційних проблем, таких як скорочення терміну служби дорожнього одягу. Подальші дослідження можна спрямувати на вивчення основних факторів, що сприяють виникненню температурних перепадів, та оцінити їхній довготривалий вплив на експлуатаційні характеристики дорожнього одягу.

4. Проблема мінливості якості асфальту через вплив різних параметрів.

Тези дисертації PDEng Makarov D. [30] присвячені проблемі мінливості якості асфальтобетонних робіт, спричиненої нехтуванням важливими параметрами. Автор має на меті розробити систему управління процесом у реальному часі, щоб забезпечити бригади асфальтоукладальників миттєвими даними для посиленого контролю процесу під час будівництва.

Дослідження включає аналіз проблем, пошук рішень та розробку гнучкої системи з такими складовими, як модуль асфальтоукладальника, модуль котка, модуль станції охолодження кривої

та модуль зв'язку. Ця система має на меті покращити якість будівництва асфальтобетонного покриття, пропонуючи дані в реальному часі для точних стратегій укладання та ущільнення. На рис. 5 продемонстровано прототип для екрану роликів планшета. Незважаючи на отриманий результат, автор підкреслює недоліки сучасних промислових рішень, вказуючи на потребу в інтегрованих рішеннях, пристосованих до конкретних потреб асфальто-будівельних компаній.

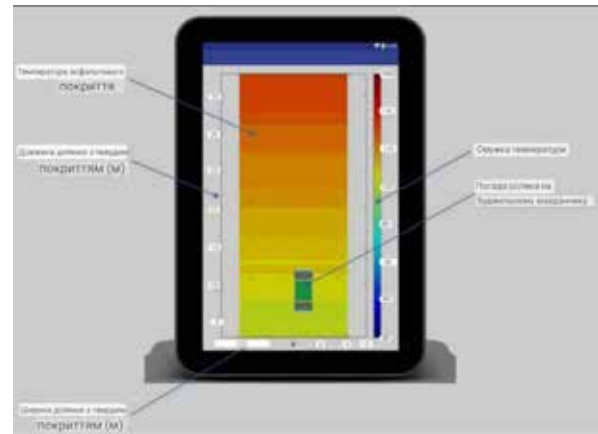


Рис. 5. Відображення даних про температуру асфальтового покриття в реальному часі [30]

На закінчення, автор пропонує вирішувати проблему мінливості якості асфальту за допомогою системи управління процесом в реальному часі. Це дослідження робить цінний внесок у розвиток галузі, а також вказує на можливості для подальшого розвитку в цій сфері.

Дослідження авторів роботи [31] проводилось в два ієрархічні етапи. По-перше, зразки регенованого асфальтобетону (РАБ) були відібрані з чотирьох польових складів. Варіабельність матеріалу рапсу була встановлена на основі лабораторних випробувань. По-друге, було проведено факторний аналіз для розробки сумішей з різним вмістом рапсу – від низького (10%) і середнього (25%) до високого (40%). Зокрема, були розглянуті різні умови змішування між РАБ та первинними в'язучими, включаючи нульове, часткове та повне змішування. Для прогнозування експлуатаційних характеристик дорожнього одягу, включаючи руйнування та якість руху для кожного сценарію проектування, було використано Механіко-емпіричний посібник з проектування дорожніх покриттів. Було виявлено взаємозв'язок (1) між вмістом РАБ та варіабельністю експлуатаційних характеристик і (2) між варіабельністю різних експлуатаційних характеристик через варіабельність матеріалів ПДР.

Авторами статті [32] було досліджено вплив мінливості товщини та жорсткості шарів дорожнього покриття. Варіабельність цих параметрів описувалась їх середніми значеннями, стандартними відхиленнями та функціями розподілу ймовірностей. Метод моделювання Монте-Карло використовувався для врахування мінливості проектних параметрів і побудови функції розподілу ймовірностей вихідних даних. Програмне забезпечення KENLAYER використовувалося для розрахунку відгуку тротуару в задалегідь визначених критичних місцях. Отримані відгуки використовувалися для прогнозування характеристик тротуару щодо постійної деформації, розтріскування від втоми знизу вгору та зверху вниз за допомогою моделей механістичного емпіричного керівництва з проектування тротуарів (MEPDG). Було розроблено код Matlab для виконання цього аналізу та отримання функції розподілу ймовірностей показників ефективності дорожнього покриття з часом. Було виявлено, що мінливість товщини шару дорожнього одягу та його жорсткість має значний вплив на характеристики дорожнього покриття. Крім того, було встановлено, що не тільки середнє значення прогнозованих показників ефективності зростає з часом, але і дисперсія цих показників також збільшується.

Це означає, що стан дорожнього одягу можна описати не середніми значеннями показників, а функцією розподілу ймовірностей, яка може описати стан дорожнього покриття на будь-якому рівні надійності.

Висновки. Дослідження показало, що температурні перепади в асфальтобетонному покритті мають великий вплив на кількість повітряних пустот та тривалість його служби. Важливо врахувати ці перепади під час будівництва для досягнення оптимальної щільності та покращення якості дорожнього покриття.

Гнучка система, яка включає модулі для керування процесом укладання асфальтобетонного покриття, має на меті покращити якість будівництва шляхом надання даних в реальному часі для точних стратегій укладання та ущільнення. Проте існують недоліки сучасних промислових рішень, і потрібні інтегровані рішення, що враховують конкретні потреби асфальто-будівельних компаній.

Автоматизація процесу керування формуванням асфальтно-бетонних покриттів є важливим кроком у покращенні інфраструктури автомобільних доріг. Ефективна система керування процесом може значно знизити витрати на ремонт доріг та підвищити якість дорожнього покриття.

Список літератури:

1. Sedy Lender. Prevent Temperature Segregation with a Thermal Profile. *AsphaltPro Magazine*. Jan.21. 2024.
2. How to Monitor Asphalt Temperature with IIoT Devices. Omega Company Brochure. *Michigan City, USA*, 2024. URL: <https://www.omega.com/en-us/resources/iiot-asphalt-temperature> (дата звернення: 19.03.2024).
3. Infrared Asphalt Repair: The Superior Pavement Repair Technique. *Everline Coatings*. August 18, 2022.
4. Efren Diez-Jimenez *et al.* Lightweight Equipment for the Fast Installation of Asphalt Roofing Based on Infrared Heaters. *Energies* 2019. Vol. 12 (22), 4253.
5. Chris Hill. Infrared, all-in-one, 3D pothole repair solutions on the rise, but the basics still rule. *Equipment World*. Jul 11, 2016.
6. Hofstrom, Brian. 10 Things You Should Know about Infrared Asphalt Restoration and Repair. *Asphalt. The magaz. of the asphalt institute* 2012. V27, № 3. P. 25-27.
7. Working Safely with Infrared. *Construction*. March 1, 2016. URL: <https://www.forconstructionpros.com> (дата звернення: 20.03.2024).
8. *Hot Oil Heaters – Thermal Fluid Heaters*. Meeker Equipment Company Brochure. Belleville, PA, USA. 2024. URL: <https://www.meekerequipment.com/productDetails-10> (дата звернення: 19.03.2024).
9. Thermal Oil Heaters with Natural Gas Burner. Sigma Thermal Brochure. URL: <https://www.sugimat.com/en/products/thermal-oil-heaters-with-natural-gas-burner> (дата звернення: 20.03.2024).
10. Speight, J. G. Asphalt Materials Science and Technology. Butterworth Heinemann. *Technology & Engineering* 2015. 650 p.
11. Speight, J. G. Asphalt Paving Technology: Proceedings of the Technical Sessions of the 2019 Annual Meeting of the Transportation Research Board. *National Academies Press*. 2019.
12. Ratman. Thermal oil heater asphalt. *PT. Indira Mitra Boiler* published 10.12.2023.
13. How to Prepare Your Asphalt Plant for Success During the Off-Season. Enerquip Brochure. Jan. 9, 2018. URL: <https://www.enerquip.com> (дата звернення: 20.03.2024).

14. Jahanbakhsh H. *et al.* Sustainable asphalt concrete containing high reclaimed asphalt pavements and recycling agents: Performance assessment, cost analysis, and environmental impact. *Journal of Cleaner Production*. 2020. Vol. 244, 118837.
15. Kai Liu *et al.* Calculative method of effective induction heating depth and its influences on induction healing of dense-graded asphalt pavement. *Construction and Building Materials*. 2022. Vol. 359, 129388.
16. Hamid Jahanbakhsh *et al.* Induction heating and induced healing evaluation of the asphalt concretes incorporating conductive aggregates exposed to microwave radiation. *Construction and Building Materials*. 2024. Vol. 416, 135126.
17. Karimi M. M., Jahanbakhsh H., Nejad F. M. Energy-based approach to characterize induced heating of asphalt concrete under electromagnetic field. *Construction and Building Materials*. 2020. V. 273, 121762.
18. Mohammad M. Karimi *et al.* Induced heating-healing characterization of activated carbon modified asphalt concrete under microwave radiation. *Construction and Building Materials*. 2018 Vol. 178. P 254-271.
19. Jie Gao *et al.*, Microwave deicing for asphalt mixture containing steel wool fibers, *Journal of Cleaner Production*. 2019. Vol. 206. P 1110-1122.
20. H. Jahanbakhsh *et al.* Correlation between asphalt concrete induced healing and rheological properties of asphalt binder. *Construction and Building Materials*. 2020. Vol. 265, 120577.
21. Saeed Amani, Amir Kavussi, Mohammad M. Karimi, Effects of aging level on induced heating-healing properties of asphalt mixes. *Construction and Building Materials*. 2020. Vol. 263, 120105.
22. Maliszewski M. *et al.* Full-Scale Use of Microwave Heating in Construction of Longitudinal Joints and Crack Healing in Asphalt Pavements. *Materials (Basel)*. 2021 Sep. 14(18): 5159. Doi: 10.3390/ma14185159.
23. Chen C., Williams R.C., Ahmed EI. T., Lee H.D., Schram S. Quality control/quality assurance testing for longitudinal joint density and segregation of asphalt mixtures. *Constr. Build. Mater.* 2013. 47:80–85. Doi: 10.1016/j.conbuildmat.2013.05.007.
24. Gulisano F., Gallego J. Microwave heating of asphalt paving materials: Principles, current status and next steps. *Constr. Build. Mater.* 2021; 278:121993. Doi: 10.1016/j.conbuildmat.2020.121993.
25. Wang H., Zhang Y., Zhang Y., Feng S., Lu G., Cao L. Laboratory and Numerical Investigation of Microwave Heating Properties of Asphalt Mixture. *Materials*. 2019. 12:146. Doi: 10.3390/ma12010146.
26. Liu, Q.; Chen, C.; Li, B.; Sun, Y.; Li, H. Heating Characteristics and Induced Healing Efficiencies of Asphalt Mixture via Induction and Microwave Heating. *Materials (Basel)* 2018. 11, 913. <https://doi.org/10.3390/ma11060913>.
27. Ter Huerne H., Miller S., Dorée A. Monitoring hot mix asphalt temperature to improve homogeneity and pavement quality. *ResearchGate*. 2009.
28. Brock, J. D. & Jakob, H. Temperature Segregation/Temperature Differential Damage. *Astec Industries, Inc.* 1997.
29. Mahoney Joe P. *et al.* Construction related temperature differentials in asphalt concrete pavement – Identification and assessment. *Construction* 2000, 93-100. <https://doi.org/10.3141/1712-12>.
30. Makarov D. Developing a real-time process control system for asphalt paving and compaction. *PDEng Thesis*. University of Twenty. 2017. 65 p.
31. Hong, F., Guo, R., & Zhou, F. Impact of recycled asphalt pavement material variability on pavement performance. *Road Materials and Pavement Design*. 2014. N15. P. 841 – 855. <https://doi.org/10.1080/14680629.2014.926284>.
32. Abed, A., Thom, N., & Neves, L. Probabilistic prediction of asphalt pavement performance. *Road Materials and Pavement Design*. 2019. N20. P. 247 – 264. <https://doi.org/10.1080/14680629.2019.1593229>.

Steshenko Ya.V., Protasov A.G. AUTOMATION OF TECHNOLOGICAL PROCESSES OF FORMATION ASPHALT AND CONCRETE COATINGS

The article analyzes the technologies for the formation of asphalt concrete road surface coatings. The current state of this industry indicates the need for large-scale research to improve the quality and durability of asphalt concrete coatings, as well as for automated monitoring of road construction. Attention is focused on the main component of the technological process of laying asphalt mixture – heating during laying. It has been established that the most popular technologies among builders can be conditionally divided into three groups. The first are infrared heaters, the second – heaters on hot oil, steam and indirect fire, and the third – electric heaters. The article considers the disadvantages of these methods, which limit their use. A significant disadvantage of infrared heaters is the presence of gas cylinders working under high pressure as part of their equipment. Electric heaters are the most promising. Today, such electric heaters as induction and microwave have shown their effectiveness in the repair of asphalt pavement with cracks due to the increase in the heating temperature of the mixture, which in road engineering is called healing. Electric heaters belong to innovative

technologies. Problems in road construction also include uniformity of compaction and temperature control of hot asphalt concrete mix. The results of the study showed that thermal imaging, especially with the use of infrared technology, can make a significant contribution to the quality control of asphalt concrete laying and compaction processes. The problem of variability in asphalt quality due to the influence of various parameters can be solved by implementing an automated real-time process control system that would provide asphalt crews with instant data for enhanced process control during construction.

Key words: *diagnostics of road surface, automation of coating technology, management of the process of laying the surface.*

Ушкаренко О.О.

Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова

ВИКОРИСТАННЯ МЕТОДУ СТРУКТУРНОГО АНАЛІЗУ ТА СИНТЕЗУ ПРИ ОПТИМІЗАЦІЇ МОДЕЛЕЙ СИСТЕМ КЕРУВАННЯ

У статті розглянуто використання методу структурного аналізу та синтезу логіко-динамічних процесів перетворення аргументів при вирішенні завдання структурної оптимізації на прикладі моделі для дослідження системи частотного керування асинхронним двигуном. На етапі структурного аналізу з використанням зазначеного методу визначено якісні характеристики моделі системи керування, що було досягнуто шляхом її декомпозиції на елементи й підсистеми різного рівня та аналізу зв'язків між ними з використанням графоаналітичної форми запису, що дозволило доповнити їх логічним змістом. Використання методу структурного аналізу та синтезу логіко-динамічних процесів перетворення аргументів дозволило формалізувати зв'язок між структурою моделі системи керування та її ефективністю, виконати аналіз інформаційних потоків у системі керування та дослідити її якісні характеристики. Проведено аналіз логіко-динамічних процесів перетворення аналогових та цифрових сигналів, що відбуваються в різних елементах у складі моделі системи частотного керування асинхронним двигуном. З одного боку, це дало можливість відобразити логіко-динамічні процеси перетворення аргументів на гранично мінімізованому рівні формалізації. З іншого боку, використання такої форми запису процесів перетворення сигналів дозволяє проводити порівняльний аналіз різних варіантів структур моделей систем керування для подальшого вибору найбільш оптимальної з них та формування математичних моделей. На основі цього аналізу обґрунтовано необхідний обсяг та форми подання інформації між елементами моделі системи керування, методів її передавання та обробки для реалізації функцій частотного керування асинхронним двигуном. Практична цінність отриманих результатів полягає в тому, що запропонований підхід дозволяє зменшити часові витрати на розробку, налагодження та модельні дослідження системи керування, виконати програмну реалізацію різних алгоритмів частотного керування асинхронним двигуном для пошуку найбільш ефективного при заданих режимах роботи.

Ключові слова: структурна оптимізація, моделювання, асинхронний двигун, система керування, графоаналітична модель.

Постановка проблеми. При використанні середовища моделювання Matlab Simulink для дослідження процесів частотного керування асинхронним двигуном (АД), першочергово виконується розробка моделі системи керування, яка складається з сукупності блоків, в яких відбуваються деякі функціональні перетворення сигналів, і зв'язків між ними, що в узагальненому вигляді описують структуру системи [1-4]. Такі моделі містять в собі значний обсяг інформації про структурні властивості моделі і досить наглядні. Всі елементи, що входять до складу системи, при необхідності також можуть бути декомпозовані та представлені у вигляді комбінації окремих елементів, уточнені і конкретизовані. Пр цьому змінювати всю схему немає потреби, а достатнім є заміна окремих елементів структурними схемами, що містять декілька взаємодіючих елементів замість одного, і навпаки. При структурній оптимізації систем однією з проблем є обмеження застосування конкретного методу через особли-

вості процесів, що відбуваються в системах, що містять у своєму складі елементи різної фізичної природи. Перетворення моделей, зокрема їх оптимізація, може виконуватись як евристичним шляхом, що базується на знаннях та досвіді дослідника, або з використанням математичних методів, що є більш доцільним. Використання математичних методів дозволяє запобігти необґрунтованих спрощень моделі. При цьому зберігається можливість аналізу процесів перетворення інформації в моделі, що є обов'язковим для перевірки адекватності отриманої моделі. Відсутність єдиного математичного апарату для опису процесів у системах з елементами, що мають різну фізичну природу, зумовлюють необхідність продовження досліджень у цьому напрямку.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Системи частотного керування АД відомих виробників, такі як ABB, Altivar, Siemens та інші, виконують обробку сигналів зворотнього зв'язку для формування керуючих сигналів. Перед пере-

даванням цих сигналів в мікроконтролер виконується їх аналого-цифрове перетворення. В свою чергу, мікроконтролер може містити математичну модель асинхронного двигуна [1, 5], і для розрахунку керуючих впливів використовуються значення вимірних параметрів. За необхідності може бути виконана оптимізація структури моделі для моделювання таких систем частотного керування АД. Це дозволить виконати декомпозицію системи, виділити елементи системи, визначити склад сигналів зворотнього зв'язку. В свою чергу, після виконання цього етапу стане зрозумілим, які з елементів системи можуть бути реалізовані програмно в мікроконтролері та усунути надлишковість моделі. В такому випадку мікроконтролер повинен мати достатньо ресурсів для реалізації функцій частотного керування АД (таймери, комунікаційні інтерфейси, АЦП, виконувати розрахунки, оперуючи числами з плаваючою комою з достатньою швидкістю та ін.).

Формалізація таких структурних моделей досить складна, оскільки, з деякої точки зору, представляє собою процес переходу від її змістовного опису до математичної моделі [6-8]. При цьому слід зазначити, що структурна схема моделі не є моделлю структури. Тому завдання розробки інструменту для аналізу і синтезу структур моделей систем є достатньо актуальною. Головною вимогою при дослідженні об'єкта як системи є наявність можливості дослідження його інформаційних аспектів, а не лише розгляд та опис енергетичних процесів, що відбуваються в ньому [9, 10]. Обумовлено це тим, що створення нових і удосконалення існуючих моделей залежить від вирішення питань, що дозволяють аналізувати наявну інформацію, позбуватися її надлишковості та виділяти основну, виконувати оцінку та забезпечувати формування альтернатив для прийняття рішень. Саме в таких випадках постає завдання оптимізації структури моделі.

Ідея структурної оптимізації моделі, що запропонована в даній роботі, полягає в її спрощенні шляхом композиції окремих елементів системи для їх програмної реалізації в мікроконтролері із збереженням заданого рівня адекватності моделі. В роботах [11, 12] зазначено, що одними з основних показників, за якими можливе виконання процесу оптимізації моделі, є затрати часу, обчислювальних ресурсів та витрат для проведення дослідження з її використанням. В основі оптимізації лежить можливість перетворення моделі з однієї форми в іншу. Сама модель при цьому може стати розсосеред-

женою, мультикомп'ютерною. Силова частина моделі системи частотного керування АД може бути створена в середовищі Matlab Simulink, а керуюча частина бути реалізована, наприклад, в середовищі моделювання Proteus, як показано в роботах [10, 13]. Крім того, в такому випадку модель мікропроцесорної системи керування управління може бути представлена реальним пристроєм, що підключається до комп'ютера, і з використанням спеціальних комунікаційних модулів в Matlab, як показано в [14], виконувати функції керування силовою частиною напівпровідникового перетворювача.

Постановка завдання. Метою дослідження є аналіз моделі для дослідження процесів частотного керування асинхронним двигуном, що містить в своєму складі напівпровідникові перетворювачі електроенергії, та виконання її структурної оптимізації для усунення надлишковості шляхом композиції окремих елементів, які виконують перетворення зовнішніх впливів в інформаційні сигнали, а також відтворюють в собі процеси на інформаційному рівні.

Виклад основного матеріалу. Для формування керуючих впливів при роботі асинхронного двигуна необхідно вимірювати деякі його параметри, що використовуються в контурах зворотних зв'язків. В середовищі моделювання Matlab Simulink для вимірювання таких параметрів зазвичай використовується спеціальний блок – Machine Measurement Demux, у вікні налаштувань якого є можливість вибрати ті параметри, які необхідно вимірювати [2]. На рис. 1 представлено фрагмент моделі, в якій блок Machine Measurement Demux виконує вимірювання струмів трьох фаз, частоти обертання ротора асинхронного двигуна та моменту на його валу. Як зазначено в роботі [5], для створення моменту навантаження на валу двигуна в контурі зворотнього зв'язку використовується вимірне значення обертів ротора АД. З використанням блоку осциллографа є можливість візуалізувати осцилограми сигналів. На рис. 1 в якості прикладу також наведено аналітичний опис окремих елементів, що дозволить в подальшому отримати структурну модель системи.

Символом (\rightarrow) на рисунку позначено функціональний аналоговий зв'язок, а символом (\equiv) – функціональний логічний зв'язок. Елемент Gain являє собою коефіцієнт підсилення, що використовується для перетворення виміряного сигналу частоти обертання ротора (Rotor) функціональної структури моделі асинхронного двигуна

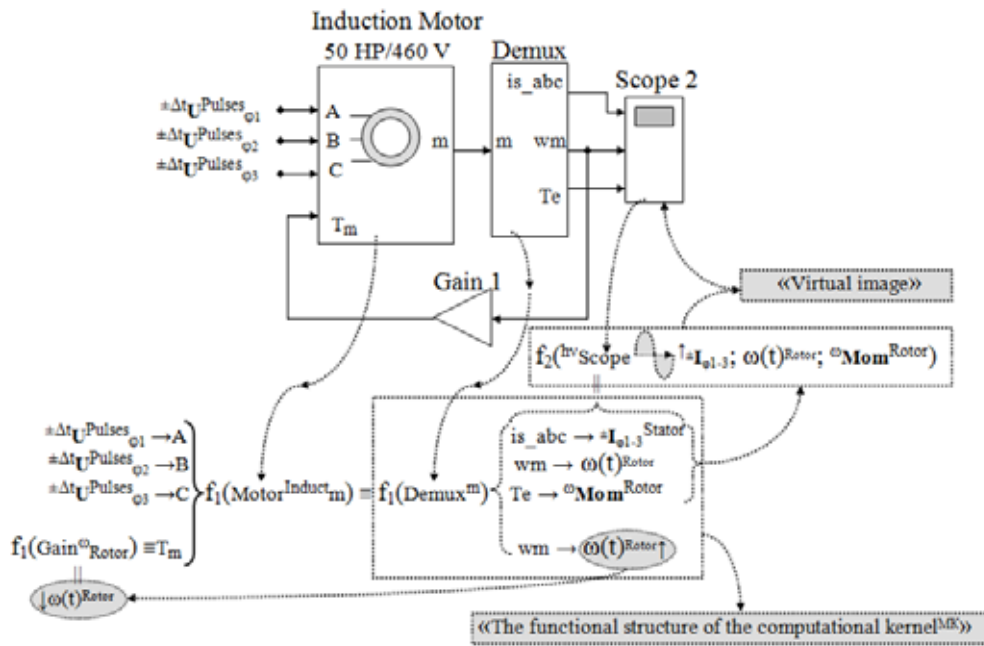


Рис. 1. Аналітичний опис структурних елементів моделі

$f_1(\text{Motor}^{\text{Induct}m}) \rightarrow f_1(\text{Motor}^{\text{Induction}m})$. За допомогою цього елемента виконується моделювання навантаження на валу АД, яке може бути описане аналітичним виразом вигляду:

$$\omega(t)_{\text{Rotor}} \rightarrow f_1(\text{Gain}^{\omega}) \rightarrow T_m \rightarrow T_{\omega}$$

Блок Induction Motor представляє собою функціональну структуру АД $f_1(\text{Motor}^{\text{Induction}m})$, в якій символ (m) містить в собі сукупність реальних аргументів (вимірних параметрів), що представлені у вигляді аналітичного виразу:

$$(m) \left\{ \begin{array}{l} \pm \mathbf{I}_{\phi 1-3}^{\text{Stator}} \\ \omega(t)_{\text{Rotor}} \\ \omega \mathbf{Mom}^{\text{Rotor}} \end{array} \right.$$

де $\pm \mathbf{I}_{\phi 1-3}^{\text{Stator}}$ – енергетичний аргумент трьохфазного струму в індуктивностях статора (Stator); $\omega(t)_{\text{Rotor}}$ – частота обертів ротора (Rotor); $\omega \mathbf{Mom}^{\text{Rotor}}$ – обертаючий момент ротора.

Для реалізації процедури формування оптичної інформації в функціональній структурі віртуального осцилографа для цих аргументів використовується функціональна структура демультиплексора (Demux) $\rightarrow f_1(\text{Demux}^m)$, і ця процедура представлена у вигляді аналітичного виразу:

$$f_2(\text{hvScope} \rightarrow \pm \mathbf{I}_{\phi 1-3}; \omega(t)_{\text{Rotor}}; \omega \mathbf{Mom}^{\text{Rotor}}),$$

де показані необхідні аргументи для подальшої обробки та використання в функціональній

структурі обчислювального ядра мікроконтролера (Core^{MK}).

В схемі системи, що представлена на рис. 2, відбувається перетворення енергії. Від зовнішнього джерела на вхід системи надходить потік енергії. В асинхронний двигун направлений вихідний потік енергії. Природним чином, процес перетворення енергії потребує інформацію. Отримання інформації, її обробка і формування сигналів керування виконуються мікроконтролером.

Вольтметр Vdc в схемі на рис. 2 використовується для вимірювання значення постійної напруги на виході пасивного LC-фільтра, і описується аналітичним виразом:

$$\left. \begin{array}{l} +U_{\text{Const}} \\ -U_{\text{Const}} \\ [U_j] \end{array} \right\} f_1(\text{ADC}) = [V_i^{\text{dc}}] \rightarrow V_{\text{dc}}^{\text{Const}} \quad (1)$$

За допомогою функціональної структури аналого-цифрового перетворювача $f_1(\text{ADC})$ з вхідною структурою опорних напруг $[U_j]$ і вхідними напругами $+U_{\text{Const}}$ і $-U_{\text{Const}}$ представлений вольтметр.

Блок вольтметра Vab_inv використовується для вимірювання лінійної напруги, яка формується на виході інвертора, і описується аналітичним виразом:

$$\left. \begin{array}{l} \pm \Delta t \text{Pulses } U_{\phi 1} \\ \pm \Delta t \text{Pulses } U_{\phi 2} \\ [U_j] \end{array} \right\} f_2(\text{ADC}) = [V_i^{\text{ab}}] \rightarrow \pm \Delta t V_{\text{ab}}^{\text{Pulses}} \quad (2)$$

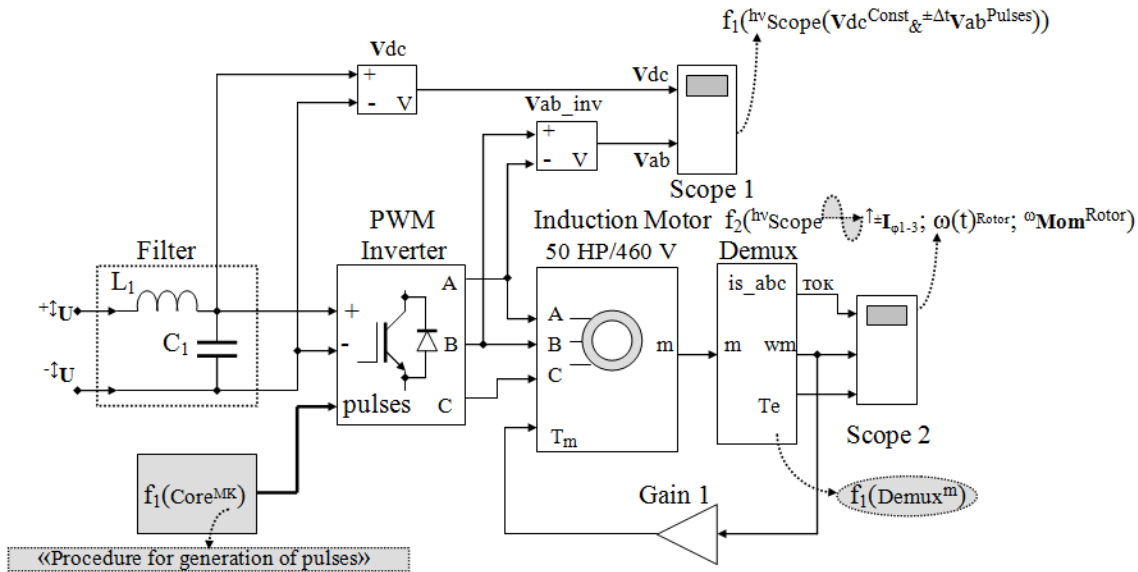


Рис. 2. Силова частина моделі системи частотного керування АД

Функціональною структурою аналого-цифрового перетворювача $f_2(ADC)$ з вхідним масивом опорних напруг $[U_j]$ і вхідними імпульсними напругами $\pm\Delta tPulsesU_{\varphi 1}$ й $\pm\Delta tPulsesU_{\varphi 2}$ представлено вольтметр.

Аналітична форма запису блоку осцилографа «Scope 1», що наведена далі, є особливістю опису системи:

$$f_1(hvScope(Vdc^{Const} \& \pm\Delta tVab^{Pulses})).$$

Зміст цього аналітичного виразу полягає в тому, що в даній функціональній структурі результуюча інформація представлена в оптичній формі (hv) і містить процедуру представлення інформаційного змісту аргументу випрямленої напруги (Vdc^{Const}) та аргументів імпульсних напруг ($\pm\Delta tVab^{Pulses}$), що в функціональній структурі блоку осцилографа «Scope 1» в оптичній формі можуть бути представлені у вигляді, наведеному на рис. 3.

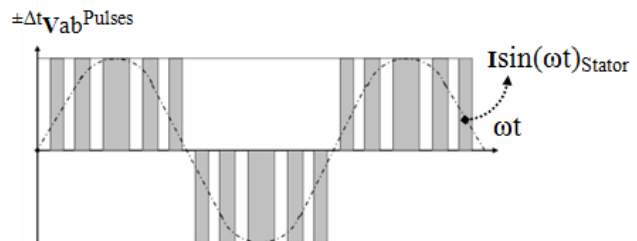


Рис. 3. Осцилограми лінійної напруги і фазного струму асинхронного двигуна

Фазний струм синусоїдальної форми статора позначено на рисунку як $I_{sin(\omega t)_{Stator}}$. Слід зазначити при цьому, що доцільно записати функціональну структуру осцилографа $f_1(hvScope(Vdc^{Const} \& \pm\Delta tVab^{Pulses}))$ без функціональних графічних зв'язків, а з функціональними структурами вхідних аналого-цифрових перетворювачів $f_1(ADC)$ і $f_2(ADC)$ – у вигляді графоаналітичного виразу:

$$\left. \begin{aligned} &+U_{Const} = \\ &U_{Const} = \\ &[U_j] = \end{aligned} \right\} f_1(ADC) = [V_{i^{dc}}] = \left. \begin{aligned} &Vdc^{Const} \\ &f_1(hvScope(Vdc^{Const} \& \pm\Delta tVab^{Pulses})), \\ &\pm\Delta tVab^{Pulses} \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

$$\left. \begin{aligned} &\pm\Delta tPulsesU_{\varphi 1} = \\ &\pm\Delta tPulsesU_{\varphi 2} = \\ &[U_j] = \end{aligned} \right\} f_2(ADC) = [V_{i^{ab}}] = \left. \begin{aligned} &Vdc^{Const} \\ &\pm\Delta tVab^{Pulses} \end{aligned} \right\}$$

де на екрані віртуального осцилографа «Scope 1» буде відображатися послідовність вхідних аргументів осцилографа.

Деталізована модель формування керуючих сигналів, що поступають на напівпровідниковий перетворювач електроенергії (інвертор) у складі

силової частини системи частотного керування АД, представлена у вигляді сукупності окремих блоків на рис. 4.

На рисунку використано наступні позначення: freq – опорне значення частоти; Gain – коефіцієнт підсилення; Product – блок добутку;

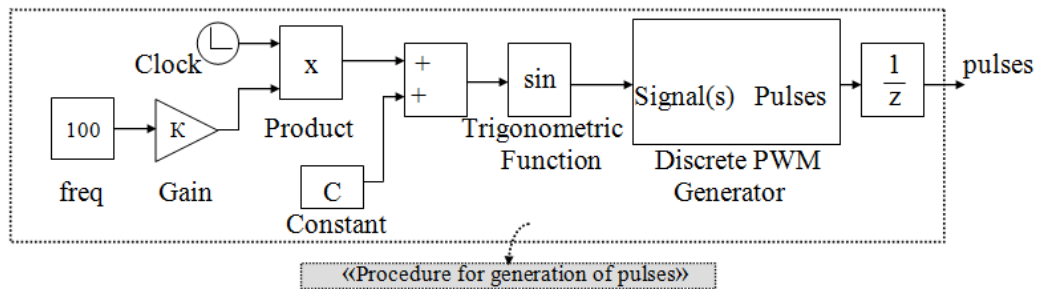


Рис. 4. Модель підсистеми формування сигналів керування на інвертор

Constant – числове значення (константа); Trigonometric Function – тригонометрична функція; Clock – задавач сигналу часу; Discrete PWM Generator – ШІМ-генератор. Ця модель підсистеми формування сигналів керування може бути реалізована програмно в мікроконтролері. Тому в модель слід ввести функціональну струк-

туру обчислювального ядра мікроконтролера $f_1(\text{Core}^{\text{MK}})$.

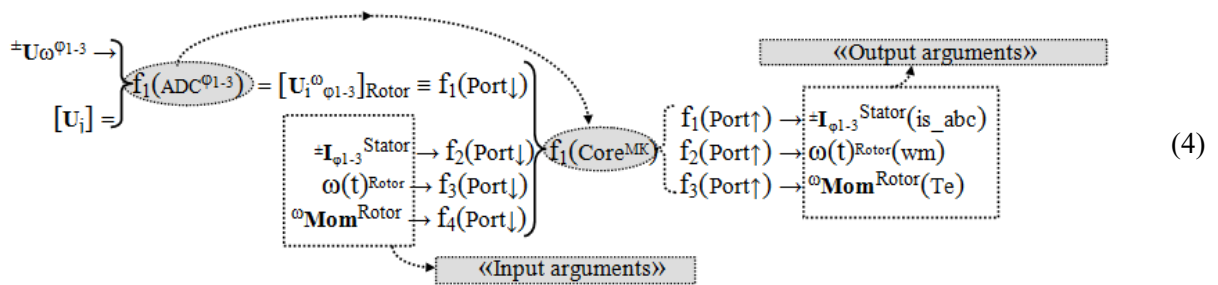
Оптимізація структури моделі. Аналіз аналітичного опису системи і процесів перетворення інформації дозволяє зробити висновок, що при фізичній реалізації системи окремі функціональні структури віртуальних осцилографів можуть бути

$$f_1(\text{Scope}(\text{Vdc}^{\text{Const}} \pm \Delta t \text{Vab}^{\text{Pulses}})), f_2(\text{Scope}^{\text{I}_{\phi 1-3}} \rightarrow \text{I}_{\phi 1-3}; \omega(t)^{\text{Rotor}}; \omega^{\text{Mom}}^{\text{Rotor}}),$$

виключені, оскільки у відповідності з аналітичним виразом (3) їх призначення полягає у реалізації візуального оптичного контролю параметрів та процесу зміни значень відповідних вхідних аргументів. Також функціональна структура демультіплексора $f_1(\text{Demux}^m)$ є надлишковою, оскільки

функції, що покладаються на неї, виконуються функціональною структурою обчислювального ядра мікроконтролера $f_1(\text{Core}^{\text{MK}})$.

Слід також зазначити при цьому, що якщо розглядати схему, наведену на рис. 2, представивши її аналітичним виразом:



тоді можна побачити, що обчислювальне ядро мікроконтролера, представлене функціональною структурою $f_1(\text{Core}^{\text{MK}})$, містить процедуру аналого-цифрового перетворення $f_1(\text{ADC}^{\phi 1-3})$, тому вираз (4) може бути записаний без функціональної структури $f_1(\text{ADC}^{\phi 1-3})$ у вигляді виразу (5).

На рис. 5 представлено схему, отриману в результаті виконання структурної оптимізації, яка забезпечує процес частотного керування АД та контроль його параметрів.

Аналітична форма запису функціональної структури АД $f_1(\text{Motor}^{\text{Induct}}L_3)$ з результуючим аргументом $\omega^{\text{Mom}}^{\text{Rotor}}$ моменту обертання ротора двигуна і інформаційним аргументом напруги трьох фаз $\pm U_{\omega}^{\phi 1-3}$ в індуктивностях статора, що задає швидкість обертання ротора двигуна, є особливістю моделі. Слід зазначити при цьому, що для функціональної структури АД $f_1(\text{Motor}^{\text{Induct}}L_3)$ необов'язковим є формування інформаційних аргументів напруги $\pm U_{\omega}^{\phi 1-3}$ трьох фаз в індуктивностях статора, і наявність інформації про аргу-

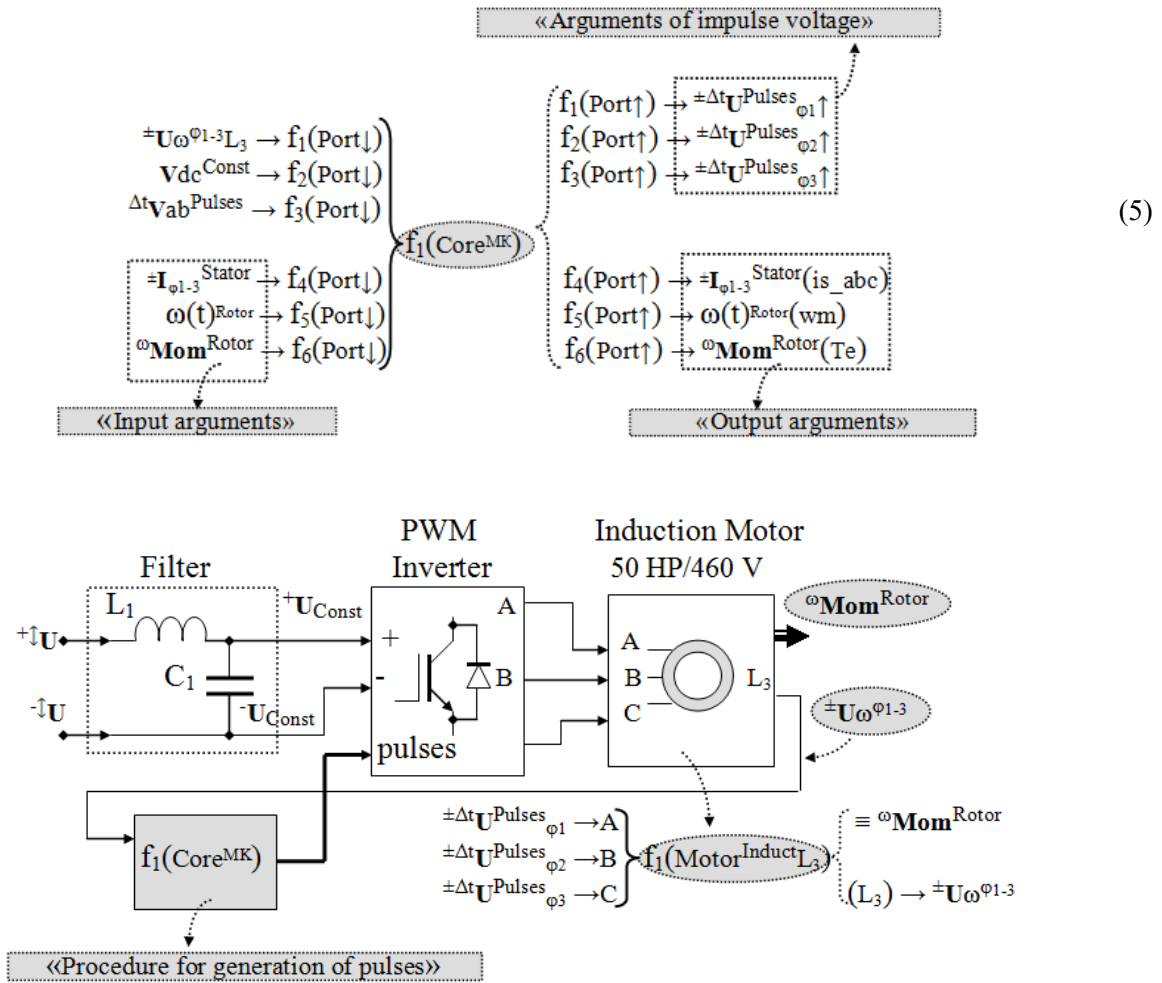


Рис. 5. Модель системи керування АД після структурної оптимізації

мент напруги однієї з фаз в індуктивності статора буде достатньою.

Висновки. В результаті аналізу моделі для дослідження процесів частотного керування асинхронним двигуном було виконано її структурну оптимізацію, в результаті чого усунуто надлишковість шляхом композиції окремих підсистем початкової моделі. Представлення структури моделі в аналітичній формі дозволило виділити такі підсистеми, які можуть бути реалізовані програмно в мікроконтролері, та сигнали зворотних зв'язків, які для цього необхідні та можуть бути оброблені. Мікроконтролер здатний перетворювати зовнішні сигнали (сигнали зворотного зв'язку) з використанням вбудованого аналого-цифрового перетворювача або різних цифрових інтерфейсів в інформаційні сигнали, передавати та переносити інформацію за допомогою портів введення/виведення, а також відтворювати

в собі процеси на інформаційному рівні, генерувати інформацію відповідно із програмно реалізованими алгоритмами. Аналіз процесів перетворення інформації підтверджує адекватність моделі після виконання її структурної оптимізації. Отримана оптимізована структура моделі для дослідження процесів частотного керування асинхронним двигуном може бути реалізована як мультикомп'ютерна, або містити елементи апаратної реалізації окремих підсистем, які взаємодіють між собою за допомогою комунікаційних інтерфейсів. Практична користь отриманих результатів полягає в тому, що запропонований підхід дозволяє зменшити часові витрати на розробку, налагодження та дослідження системи керування, програмно реалізувати та дослідити різні алгоритми частотного керування асинхронним двигуном для пошуку найбільш ефективного при заданих режимах роботи.

Список літератури:

1. Vector Control of Induction Machines / Robyns B. et al. Power Systems : Springer-Verlag London, 2012. 222 p. DOI: 10.1007/978-0-85729-901-7
2. Ozpineci B., Tolbert L.M. Simulink implementation of induction machine model – a modular approach. Electric Machines and Drives Conference, IEMDC'03. IEEE International, 1-4 June 2003 / Madison, WI, USA, 2003. P. 728–734. DOI: 10.1109/IEMDC.2003.1210317
3. Рябенський В.М., Ушкаренко О.О., Воскобоєнко В.І. Моделювання мікропроцесорних систем управління газодизель-генераторними установками. Вісник Національного університету «Львівська політехніка». 2009. № 637. С. 78–82.
4. Abdul Wahab H.F., Sanusi H. Simulink Model of Direct Torque Control of Induction Machine, *American Journal of Applied Sciences*. 2008. Vol. 5. P. 1083–1090.
5. Momoh O.D. Dynamic Simulation of Cage Rotor Induction Machine – A Simplified and Modular Approach. *The 44th IEEE Southeastern Symposium on System Theory*, 11-13 March 2012, Jacksonville, Florida, USA, 2012. P. 200–203. DOI: 10.1109/SSST.2012.6195112
6. Рябенський В.М. Ушкаренко О.О., Аль-Суод Махмуд Мохаммад, Халед Омар Ганнам. Імітаційне моделювання процесів комутації споживачів в автономних електроенергетичних установках. *Збірник наукових праць НУК*. 2011. № 4. С. 123–129.
7. Saini R.K., Saini D.K., Gupta R., Verma P. Optimized Design of Three Phase Squirrel Cage Induction Motor based on Maximum Efficiency Operating under the Rated Voltage – based on Software Platform. *Indian Journal of Science and Technology*. 2016. No. 21. P. 1–7. DOI: 10.17485/ijst/2016/v9i21/92002
8. Shell R.L., Ernest L.H. Handbook of Industrial Automation. New York : Marcel Dekker, 2000. 857 p. DOI: 10.1201/9780203908587
9. Al-suod M.M.S., Ushkarenko A.O., Dorogan O.I. Monitoring and Automatic Control for Ship Power Plants Based Logical Algorithms. *International Journal of Advanced Computer Research (IJACR)*. 2014. No. 17. P. 966–972.
10. Gardner C., Johnson D., Provine J. Networked Intelligent Instrumentation & Control for Switchboards. *Electric Ship Technologies Symposium*, 21-23 May 2007, Hyatt Regency Crystal City, Arlington, Virginia, USA, 2007. P. 510–518. DOI: 10.1109/ESTS.2007.372134
11. Choudhary P.K., Dubey S.P., Gupta V.K. Efficiency optimization of induction motor drive at steady-state condition. *Control, Instrumentation, Communication and Computational Technologies (ICCICCT)*, International Conference on 18-19 December 2015, Noorul Islam University, Kumaracoil, Kanyakumari District, Tamilnadu, 2015. P. 498–503. DOI: 10.1109/ICCICCT.2015.7475325
12. Hasan M.D., Kumar A., Akhtar J. Design Optimization of Linear Induction Motor. *International Conference on Power Electronics Systems and Applications (PESA)*, 15-17 December 2015, Hong Kong, 2015. P. 1–5. DOI: 10.1109/PESA.2015.7398889
13. Fazlipour Z., Kianinezhad R., Razaz M. Genetic Algorithm Based Design Optimization of a Six Phase Induction Motor. *Journal of Electrical Engineering and Technology*. 2015. No. 10. P. 1007–1014. DOI: 10.5370/JEET.2015.10.3.1007
14. Рябенський В.М., Дорогань О.І., Ушкаренко О.О. Автоматизація процесів моніторингу параметрів та керування автономними електроенергетичними системами з дизель-генераторними агрегатами : монографія. Миколаїв : НУК, 2017. 240 с.

Ushkarenko O.O. USING THE METHOD OF STRUCTURAL ANALYSIS AND SYNTHESIS IN THE OPTIMIZATION OF CONTROL SYSTEM MODELS

The use of the structural analysis and synthesis of logical-dynamic processes of arguments transformation method in solving problems of structural optimization on the example of a model for studying a frequency control system for an induction motor is considered in the paper. At the stage of structural analysis, using this method, the qualitative characteristics of the control system model were determined, which were achieved by decomposing it into elements and subsystems of different levels and analyzing the relationships between them using a graphic-analytical form of notation, which made it possible to supplement them with logical content. The use of the method of structural analysis and synthesis of logical-dynamic processes of arguments transformation made it possible to formalize the relationship between the structure of the control system model and its effectiveness, analyze information flows in the control system and explore its qualitative characteristics. The analysis of logical-dynamic processes of analog and digital signals conversion performed in various elements as part of a frequency control system for an induction motor has been carried out. On the one hand, this made it possible to determine the logical-dynamic processes of argument transformation at the boundary-minimized form level. On the other hand, using such a form of signal transformation processes notation makes

it possible to perform the analysis of the various variants of control system structural models intended for further selection of the most suitable of them and to form their mathematical models. Based on this analysis, the necessary volumes and forms of information presentation between the elements of the control system model, methods of its transmission and processing for the implementation of frequency control functions of an induction motor are substantiated. The practical value of the obtained results is that the proposed approach allows to reduce the time spent on development, debugging and model studies of the control system, to perform software implementation of various frequency control algorithms for an induction motor in order to find the most effective one under the specified operating modes.

Key words: *structural optimization, modeling, induction motor, control system, graph-analytical model.*

Фант М.О.

Державний університет «Житомирська політехніка»

ПОРІВНЯЛЬНИЙ АНАЛІЗ НЕКОНТРОЛЬОВАНИХ МЕТОДІВ ОЦІНКИ ЕКСТРАКТИВНИХ АНОТАЦІЙ

У статті представлено аналіз неконтрольованих методів оцінки екстрактивних анотацій. У дослідженні використано шість загальновідомих та поширених алгоритмів генерування екстрактивних анотацій: Луна, дивергенції Кульбака – Лейблера, редукації, TextRank, LexRank, LSA. За допомогою обраних алгоритмів в ході дослідження згенеровано анотації для 1000 англійських текстів, відібраних з Вікіпедії. Для кожного тексту для порівняльного аналізу додатково також згенеровано по одній анотації випадковим чином. Для оцінок згенерованих анотацій було відібрано чотири методи, які належать до двох груп: SummaQA-prob, SummaQA-fscore, BLANC-help, BLANC-tune. Проаналізовано стандартне відхилення числового значення оцінок однотипних анотацій, отриманих одним методом. Доведено надійність та послідовність методів дослідження на основі гомогенності стандартного відхилення поміж усіх чотирьох методів оцінки анотацій. Встановлено, що обидва методи BLANC показують кращі результати стандартного відхилення в порівнянні з методами SummaQA. Помічено особливість, що всі чотири методи оцінки анотацій показують високий ступінь стандартного відхилення на анотаціях, згенерованих алгоритмом LSA. Випадкові анотації отримують низьке значення стандартного відхилення передусім через показники методів SummaQA. Розроблено спосіб визначення стабільності методів оцінки анотацій. Цей спосіб базується на припущенні, що оцінка невідповідних анотацій має бути вищою за оцінку випадкових анотацій і чим вища така відмінність тим кращим є метод оцінки. За показником стабільності перевагу отримали також методи BLANC. Встановлено, що методи BLANC переважають методи SummaQA майже за всіма параметрами. У висновку підкреслено важливість вживання методів BLANC у парі, оскільки кожен з методів отримує свої переваги. Подальші дослідження в цьому напрямку вбачаються у порівняльному аналізі методів оцінки абстрактивних анотацій.

Ключові слова: машинне навчання, обробка природної мови, екстрактивна анотація, мовна модель.

Постановка проблеми. Сучасний етап розвитку суспільства характеризується величезним впливом інформації на кожного незалежно від роду і виду діяльності. Впродовж дня кожен з нас обробляє велику кількість усних та письмових текстів не тільки на роботі, а й на дозвіллі. Це спричиняє неабияке навантаження на пізнавальні можливості людського мозку і вимагає зменшення обсягів оброблюваних текстів без зниження їх інформаційного наповнення. В таких умовах особливого значення набувають інструменти для автоматичного анотування, які надають змогу стискати обсяги текстів завдяки скороченому викладу основної думки тексту.

В світлі окресленої проблематики важливо дати визначення поняттю *анотування*, а також виокремити підвиди анотацій. В цій статті під *анотуванням* ми розуміємо процес створення нового тексту на основі вхідного тексту, при чому обсяг нового тексту повинен бути істотно меншим за обсяг вхідного, а інформативність макси-

мально збережена. В залежності від техніки створення анотації виокремлюють *екстрактивні* та *абстрактивні* анотації.

Екстрактивні анотації створюються в результаті відбору найважливіших і найінформативніших речень з вхідного тексту. При цьому анотація може не відповідати традиційному поняттю текст, а є швидше множиною речень. Порядок слідування цих речень зазвичай не має значення. В прикладному аспекті такі анотації зручно використовувати для позначення відібраних речень прямо у вхідному тексті, наприклад, шляхом підсвічування найважливіших речень на веб-сайті новин.

Абстрактивні анотації орієнтовані на створення читабельного тексту, який перефразовує основний зміст вхідного тексту. Анотації такого типу найбільше розповсюджені в сфері науки, освіти та медіа. На відміну від екстрактивних анотацій важлива якісна характеристика абстрактивних анотацій – зв'язність мовлення у вихідному тексті.

Методи оцінки згенерованих анотацій можна умовно поділити на дві великі групи:

- ті що базуються на референтних анотаціях, створених людьми;
- повністю автоматизовані методи оцінки.

За аналогією до контрольованого і неконтрольованого машинного навчання, ми називаємо перший тип методів оцінки контрольованими, а другий – неконтрольованими. Варто детальніше розглянути алгоритми створення екстрактивних анотацій, а також методи їх неконтрольованої оцінки.

Аналіз останніх досліджень і публікацій.

В теоретичних дослідженнях автоматичного анотування вчені в першу чергу звертають увагу на прагматичний аспект та виділяють такі корисні цілі анотування, як: зменшення часу прочитання; полегшення процесу відбору потрібної інформації з тексту; підвищення ефективності індексації; нівелювання суб'єктивності в порівнянні з анотаціями, створеними людьми вручну; корисні для створення систем запитання-відповідь [1-2]. Водночас, почасти поза фокусом уваги вчених залишається проблема оцінювання якості згенерованої анотації.

В дослідженні [3] проведено детальний та ґрунтовний огляд видів анотацій, створено розгалужену класифікацію анотацій: за принципом зіставлення, за типом вхідної колекції, за типом змісту, за розміром анотації, за потребою користувача. Водночас що стосується методів оцінки анотацій, то автори не вдавалися в детальний аналіз і використали лише метод оцінки якості ROGUE, за характеристиками Precision та Recall.

ROGUE – одна з найпопулярніших метрик для оцінки якості анотування, яка має три підтипи ROGUE-N, ROGUE-L, ROGUE-S. Спільна проблема сім'ї метрик ROGUE – це потреба у людській праці у вигляді створення опорних анотацій, з якими алгоритм метрики порівнює згенеровану анотацію. Так само на опорних анотаціях базуються: подібність косинусів, F-міра. Такі контрольовані методи оцінки анотацій не підходять при роботі з певними видами текстів, наприклад текстів малоресурсних мов з відсутніми або недостатніми носіями, наприклад, історичних, мертвих або екзотичних мов.

В дослідженнях [4-8] відображено основні особливості і характеристики найпоширеніших і найуживаніших в сучасних дослідженнях і прикладних програмах алгоритмів анотування. Варто зазначити, що і в цих дослідженнях проблема оцінки якості анотації залишається мало освітленою. Зазвичай автори вдаються до загальних

методів оцінки згенерованого тексту, а також до різних видів порівнянь анотацій з текстами референтних анотацій. Що стосується неконтрольованих методів оцінки, то вони маловживані.

В роботах [9-10] описано принципи роботи та використання неконтрольованих методів оцінки анотацій: SummaQA і BLANC. Суттєвою перевагою цих методів над контрольованими методами є те, що вони не потребують референтних текстів, для порівняння зі згенерованими анотаціями, що уможливорює їх використання, наприклад, для текстів мертвих або малоресурсних мов. Водночас, обидва методи описані безвідносно один до одного. Тому постає питання, з якими анотаціями і в яких випадках варто застосовувати кожен з них.

Постановка завдання. Метою роботи є порівняльний аналіз неконтрольованих методів оцінки екстрактивних анотацій.

Виклад основного матеріалу. Для проведення порівняльного аналізу неконтрольованих методів оцінки екстрактивних анотацій було обрано наступні алгоритми генерування анотацій:

- алгоритм Луна (LUHN) [4];
- алгоритм на основі дивергенції Кульбака – Лейблера (KL) [5];
- алгоритм редукації (RED);
- алгоритм TextRank (TR) [6];
- алгоритм LexRank (LR) [7];
- алгоритм LSA [8];
- випадковий підбір речень (RND).

Серед неконтрольованих методів оцінки екстрактивних анотацій ми обрали *SummaQA* і *BLANC*.

Оцінка анотації за методом SummaQA проводиться за двома значеннями: мірою ймовірності (SummaQA-prob) та F-мірою (SummaQA-fscore). Міра ймовірності виражає ступінь впевненості SummaQA в істинності виведеної відповіді до референтного питання. F-міра зазвичай використовується для оцінювання якості. Вона вимірює збіг між прогнозами та базовими відповідями.

В дослідженні використано дві метрики BLANC, а саме BLANC-help і BLANC-tune. Головна відмінність між цими двома метриками наступна: BLANC-help під час аналізу використовує текст анотації напряму поєднуючи його з кожним реченням вхідного тексту, в той час як BLANC-tune використовує анотацію для точного налаштування попередньо нетренованої моделі (в нашому випадку це модель BERT), а вже потім обробляє весь документ [10].

Для проведення порівняльного аналізу неконтрольованих методів оцінки екстрактив-

них анотацій було обрано 1000 текстів англійською мовою. Тексти представляють собою статті з англійської Вікіпедії. Було підібрано короткі статті розміром до 512 стем. Лімітацію по обсягу було введено задля економії часових і обчислювальних ресурсів, оскільки тексти більшого обсягу навряд чи могли б покращити якісні показники проведеного дослідження. Кожен з текстів перед анотуванням проходив попередню обробку, яка включала реченнєву та словесну токенізацію, видалення стоп-слів, стеммінг.

Розмір анотації не перевищував 40% оригінального тексту для всіх алгоритмів генерування анотацій. В якості мовної моделі для використання в методах оцінки анотацій було використано попередньо треновану модель BERT.

Важливим показником аналізу є показник *стандартного відхилення* методу оцінки для кожного алгоритму анотування. За допомогою стандартного відхилення можна визначити рівень розсіювання оцінок анотацій різних текстів, згенерованих одним алгоритмом. Іншими словами, стандартне відхилення дозволяє визначити рівень стабільності методу оцінки одного і того ж алгоритму.

Тобто для множини S всіх оцінок анотацій, згенерованих за допомогою однакового алго-

ритму стандартне відхилення σ вираховується за формулою некоригованого стандартного відхилення (1), де s_i – це i -та оцінка цієї множини, \bar{s} – середня арифметична оцінка, а n – кількість всіх оцінок анотацій, згенерованих за допомогою однакового алгоритму. Ми використовуємо некориговане стандартне відхилення, оскільки розміри вибірки дозволяють виконати обрахунки на всій вибірці, в той час як кориговане стандартне відхилення рекомендують використовувати на частині вибірки задля уникнення девіацій.

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=0}^n (s_i - \bar{s})^2} \quad (1)$$

Показник стабільності методу оцінки відповідає інтуїції, що більш надійний метод оцінки анотації повинен давати схожі результати при застосуванні до анотацій, згенерованих за допомогою однакового алгоритму.

На рис. 1 зображені значення стандартних відхилень для кожного з методів оцінки анотацій по відношенню до окремих алгоритмів генерування анотацій. На рисунку можна прослідкувати наступні важливі особливості:

1. Обидві групи методів оцінки анотацій мають схожу форму ліній, що свідчить про надійність та послідовність результатів дослідження,

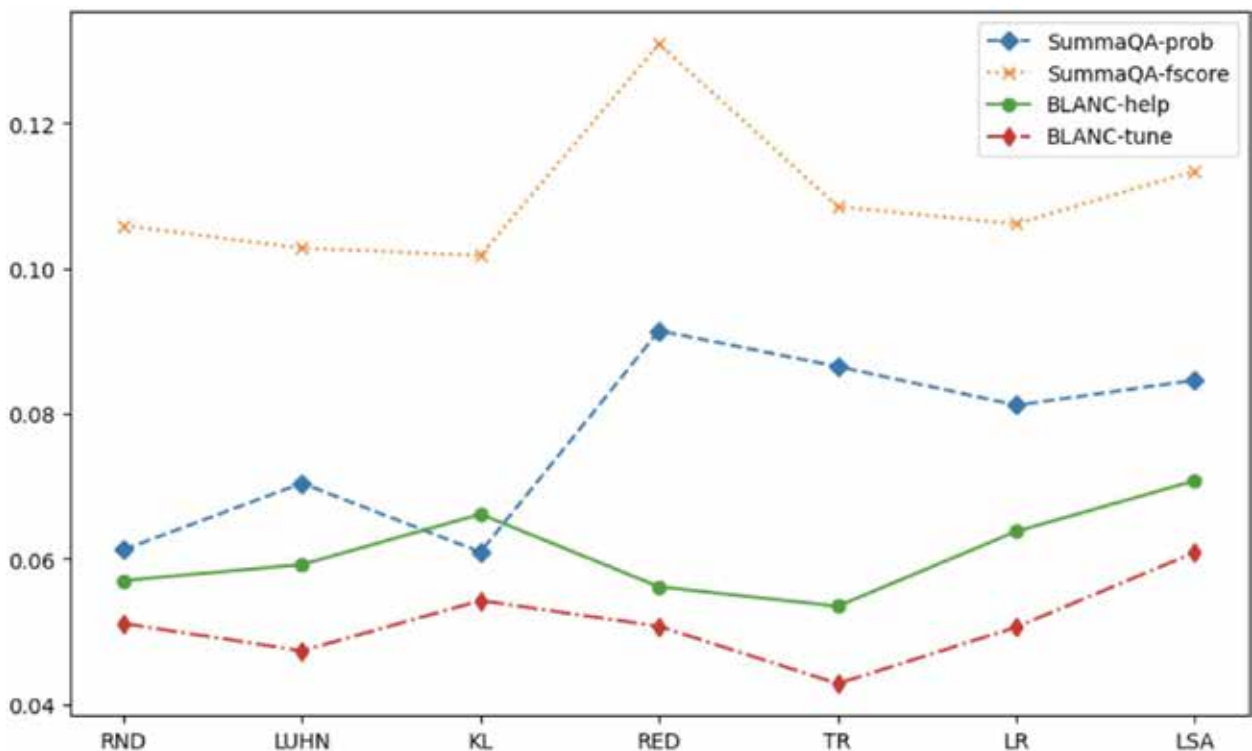


Рис. 1. Стандартне відхилення методів оцінки анотацій

адже зрозуміло, що споріднені методи оцінки мають подібним чином оцінювати анотації, згенеровані однаковою алгоритмом. Наприклад, ми бачимо, що група методів SummaQA показує найбільше розсіювання на алгоритмі редукції RED, а найменше – на алгоритмі дивергенції Кульбака – Лейблера KL. Водночас група методів BLANC найкраще впоралася з алгоритмом TR і найгірше з LSA.

2. Група методів BLANC послідовно показує менший рівень розсіювання на всіх алгоритмах. Виняток становить лише алгоритм KL, де метод оцінки BLANC-tune проявив вищий ступінь розсіювання аніж SummaQA-prob. Середні значення величини стандартного відхилення по методах оцінки анотацій можна побачити в Таблиці 1. За нею найкращим методом оцінки анотацій є BLANC-tune, на другому місці BLANC-help, а далі ідуть SummaQA-prob і SummaQA-fscore. Варто відмітити, що SummaQA-fscore суттєво відстає від інших методів.

3. Всі чотири методи оцінки анотацій показують підвищений ступінь розсіювання для алгоритму LSA, який вважається одним з найкращих. Це може бути спричинено вищою технічною складністю алгоритму LSA.

4. Анотації, згенеровані випадковим чином (RND), отримують зазвичай невисокий ступінь розсіювання, що також може свідчити про недосконалість методу оцінки алгоритму. Тут варто виокремити метод SummaQA-prob, який показав в цілому невисокий ступінь розсіювання, але в якого випадкові анотації отримали дуже низький рівень стандартного відхилення в порівнянні з іншими методами. Водночас найкраще співвідношення між випадковими і не випадковими анотаціями має метод BLANC-tune, який крім того помітно виграв в загальному розподіленні стандартного відхилення.

5. Досить несподіваний результат можна отримати, якщо створити вибірку по середнім значенням стандартного відхилення оцінки анотацій за алгоритмами анотування, що показано в табл. 2.

За цими показниками лідирують випадкові анотації з найменшим показником розсіювання. Найбільший показник розсіювання отримав алгоритм LSA. Проте якщо співставити ці результати з результатами на рис. 1, то стає зрозуміло, що девіація спричинена в першу чергу методами SummaQA, які оцінили випадкові анотації з меншим розсіюванням відносно до не випадкових анотацій.

Ще одним важливим показником є *стабільність* здатності відмежовувати анотації, згенеровані випадковим чином, від анотацій, згенерованих не випадковим методом. Під стабільністю методу оцінки анотування ми розуміємо середнє арифметичне значення відстаней від оцінки випадкової анотації (RND) певного тексту до середнього арифметичного значення оцінок всіх інших анотацій цього тексту.

Тобто для кожного тексту t_i множини всіх текстів T ми знаходимо середнє значення оцінок всіх анотацій крім випадкової анотації s_i , і віднімаємо від нього оцінку анотації, згенерованої випадковим чином $s_{i,RND}$. Загальний показник стабільності методу оцінки анотування – середнє арифметичне значення всіх різниць $s_i - e_{i,RND}$, як показано у формулі (2).

$$R = \frac{1}{n} \sum_{i=0}^n (s_i - s_{i,RND}) \quad (2)$$

Показник стабільності базується на припущенні, що всі алгоритми анотування мають створювати кращі анотації ніж випадкова. Таким чином оцінка всіх анотацій крім випадкової має бути вищою за неї. Показники стабільності методів оцінки анотацій зображено в табл. 3.

За результатами аналізу стабільності методів оцінки анотацій можна виокремити наступні співзвучні з попередніми закономірності:

1. Група методів BLANC показує вищий рівень стабільності порівняно з групою методів SummaQA. Проте варто зазначити, що на відміну від показників стандартного відхилення де, найкращим методом виявився BLANC-tune,

Таблиця 1

Середнє значення стандартного відхилення методів оцінки анотацій

SummaQA-prob	SummaQA-fscore	BLANC-help	BLANC-tune
0.076622	0.109944	0.060947	0.05111

Таблиця 2

Середнє значення стандартного відхилення оцінки анотацій за алгоритмами анотування

RND	LUHN	KL	RED	TR	LR	LSA
0.068823	0.069952	0.070793	0.082314	0.072834	0.075432	0.082438

Стабільність методів оцінки анотацій

<i>SummaQA-prob</i>	<i>SummaQA-fscore</i>	<i>BLANC-help</i>	<i>BLANC-tune</i>
0.016605	0.028529	0.033215	0.026254

а найгіршим SummaQA-fscore, за показником стабільності перше місце отримує BLANC-help, а останнє SummaQA-prob.

2. Різниця в оцінках між випадковими і не випадковими анотаціями є загалом невеликою, що частково пояснюється високим відсотком розміру згенерованих анотацій (40% від оригінального тексту), а також самим типом анотування – екстрактивним. Зрозуміло, що при абстрактивному анотуванні відмінність між випадковим і не випадковим текстом буде вищою.

Висновки. Проведено порівняльний аналіз неконтрольованих методів оцінки екстрактивних анотацій. Анотації згенеровано за допомогою семи різних алгоритмів: випадкового, Луна, дивергенції Кульбака – Лейблера, редукції, TextRank, LexRank, LSA. Оцінювання анотацій виконано за допомогою чотирьох методів, які належать до двох груп: SummaQA-prob, SummaQA-fscore, BLANC-help, BLANC-tune.

Для аналізу результатів дослідження розроблено власний розрахунок показника стабільності

(формула 4), який базується на відмінності оцінки випадкових і не випадкових анотацій.

Виявлено, що група методів BLANC має перевагу за показником стандартного відхилення (найкращим виявився BLANC-tune) і за показником стабільності (найкращим виявився BLANC-help).

Що стосується екстрактивних алгоритмів, то варто зазначити, що алгоритм LSA, який вважається одним з найкращих послідовно отримує високий показник стандартного відхилення, що характеризує його з негативної точки зору. Водночас алгоритми TextRank і LexRank виділяються низьким рівнем стандартного відхилення в межах кожного методу оцінки.

Отже, для оптимальної оцінки екстрактивних анотацій варто використовувати методи оцінки BLANC, при чому бажано використовувати їх в парі, оскільки кожен з них має свої переваги (стандартне відхилення або стабільність). Вважаємо доцільним провести подальші дослідження в цьому напрямку з оцінкою абстрактивних анотацій.

Список літератури:

1. Archana A., Sunitha C. An overview on document summarization techniques, *International Journal on Advanced Computer Theory and Engineering*. 2013. Vol. 1. No. 2. Pp. 113–118.
2. Torres-Moreno J. Automatic Text Summarization. ISTE Ltd and John Wiley & Sons, Inc. 2014. 348 p.
3. Водолазкий В., Холев В., Росінський Д., Барковська О. Рішення задачі прискореного анотування текстових документів як елемент ЕБС. *Міжнародний науковий журнал «Грааль науки»*. № 6. 2021. С. 182-190.
4. Luhn H. P. The Automatic Creation of Literature Abstracts. *IBM Journal of Research and Development*. 1958. Vol. 2. Issue 2. Pp. 159–165.
5. Haghighi A., Vanderwende L. Exploring Content Models for Multi-Document Summarization. *Proceedings of Human Language Technologies: The 2009 Annual Conference of the North American Chapter of the Association for Computational Linguistics*. 2009. Pp. 362–370.
6. Mihalcea R., Tarau P. TextRank: Bringing Order into Texts. *Proceedings of the 2004 Conference on Empirical Methods in Natural Language Processing*. 2004. Pp. 404–411.
7. Erkan G., Radev D. LexRank: Graph-based Lexical Centrality as Saliency in Text Summarization. *Journal Of Artificial Intelligence Research*. 2004. Vol. 22. Pp. 457–479.
8. Steinberger J., Ježek K. Using Latent Semantic Analysis in Text Summarization and Summary Evaluation. *Proceedings of ISIM*. 2004. Pp. 93–100.
9. Scialom Th., Lamprier S., Piwowarski B., Staiano J. Answers Unite! Unsupervised Metrics for Reinforced Summarization Models. *Proceedings of the 2019 Conference on Empirical Methods in Natural Language Processing and the 9th International Joint Conference on Natural Language Processing*. 2019. Pp. 3246–3256.
10. Vasilyev O., Dharnidharka V., Bohannon J. Fill in the BLANC: Human-free quality estimation of document summaries. *Proceedings of the First Workshop on Evaluation and Comparison of NLP Systems*. 2020. Pp. 11–20.

Fant M.O. COMPARATIVE ANALYSIS OF UNSUPERVISED EVALUATION METHODS OF EXTRACTIVE SUMMARIZATIONS

The paper presents a comprehensive analysis of unsupervised evaluation methods of extractive summarizations. Six well-known and common algorithms for generating extractive summarizations were used in the study: Luhn, Kullback-Leibler divergence, reduction, TextRank, LexRank, LSA. With the help of selected algorithms, summarizations were generated for 1000 texts selected from English Wikipedia. For each text one summarization was additionally generated randomly. Four methods were selected for evaluation of the generated summarizations: SummaQA-prob, SummaQA-fscore, BLANC-help, BLANC-tune. The standard deviation of the numerical value of the estimates of the same type of summarizations obtained by one method was analysed. The reliability and consistency of research methods are proven based on the homogeneity of the standard deviation between all four summarization evaluation methods. Both BLANC methods are found to show better standard deviation results compared to SummaQA methods. A peculiarity was noticed that all four summarization evaluation methods show a high degree of standard deviation on the summarizations generated by the LSA algorithm. A method of determining the stability of summarization assessment methods has been developed. This method is based on the assumption that the evaluation of non-random summarizations should be higher than the evaluation of random summarizations, and the higher this difference, the better the evaluation method. The BLANC methods also gained an advantage in terms of stability. BLANC methods are found to outperform SummaQA methods in almost all parameters. The conclusion emphasises the importance of using BLANC methods in pairs, as each of the methods receives its advantages. Further research in this direction can be seen in the comparative analysis of abstract summarization evaluation methods.

Key words: machine learning, natural language processing, extractive summarization, language model.

Чернишова О.О.

Euromonitor International

Домашенко С.В.

Національний університет «Запорізька політехніка»

Домашенко Д.Г.

Запорізький національний університет

ВПЛИВ ШТУЧНОГО ІНТЕЛЕКТУ НА БІЗНЕС-ПРОЦЕСИ З МЕТОЮ ОПТИМІЗАЦІЇ ТА ПОКРАЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ РОБОТИ ОРГАНІЗАЦІЇ

В умовах глобальних викликів, спричинених пандемією COVID-19 та військовою агресією РФ проти України, актуалізується потреба у цифровій трансформації бізнесу. Саме цифрові технології, зокрема, штучний інтелект (ШІ), мобільні додатки, хмарні рішення та інтегровані вебсайти, стають вирішальними інструментами для підтримки роботи понад 85% компаній у сфері послуг під час самоізоляції. Ці технології не лише забезпечують безперервність діяльності в нових умовах, а й відкривають нові можливості для розвитку та оптимізації бізнес-процесів.

Автори дослідження вказують на те, що цифровізація в сфері послуг значно трансформувала традиційні підходи до управління, продажу та взаємодії з клієнтами. Використання цифрових інструментів дозволяє значно знизити витрати, підвищити ефективність управлінських процесів і водночас розширити можливості для адаптації до змінних ринкових умов. Чат-боти та інші інструменти ШІ забезпечують швидке та якісне обслуговування клієнтів, сприяють збільшенню обсягів продажів та покращують взаємодію з клієнтською базою. Методологія дослідження охоплює теоретичний аналіз сучасного стану цифровізації, емпіричне дослідження використання цифрових інструментів у практиці, моделювання бізнес-процесів із застосуванням цифрових технологій, а також оцінку ефективності та розробку рекомендацій для оптимізації. Результати показують, що цифровізація впливає на всі аспекти діяльності компаній, починаючи від управління бізнес-процесами та закінчуючи взаємодією з клієнтами. Особлива увага приділяється ролі чат-ботів та інших інструментів ШІ, які спрощують комунікацію з клієнтами, автоматизують обробку запитів та підвищують рівень задоволення клієнтської служби. Використання цих технологій дозволяє компаніям залишатися конкурентоспроможними в умовах швидкозмінного ринку. Дослідження також наголошує на значенні компетенцій керівництва у сфері цифровізації, оскільки ефективне впровадження цифрових інновацій потребує глибокого розуміння поточних та майбутніх тенденцій в технологіях та на ринку. Таким чином, здатність компаній адаптуватися до цифрової економіки і використовувати цифрові інструменти для оптимізації бізнес-процесів стає ключовим чинником їхнього успіху та розвитку.

Ключові слова: бізнес-процеси, інформатизація бізнес-процесів, цифровізація, штучний інтелект, скрипт, чат-бот.

Постановка проблеми. У минулі п'ять років, на тлі зростання стабільної конкуренції на ринку, організації та компанії активно шукають нові методи та напрямки для підвищення своєї ефективності. Цифровізація стає ключовим трендом у розвитку бізнес-процесів сучасних організацій. Підвищення ефективності бізнес-процесів, що веде до зростання конкурентоспроможності, досягається через їх удосконалення, зокрема через впровадження цифрових технологій на основі штучного інтелекту (ШІ). У секторі послуг особливо важливою є цифровізація, яка включає

інтеграцію цифрових технологій з метою збільшення ефективності бізнесу. Це може призвести до зміни бізнес-процесів і навіть повної перебудови бізнес-моделей компаній. Економісти та галузеві експерти прогнозують, що такі зміни з часом торкнуться всіх компаній. Вони також вважають, що ретельний аналіз бізнес-процесів дозволить компаніям у сфері послуг на початковому етапі збільшити свою економічну ефективність на 2–3% у найближчі роки, а при правильному підході, це зростання буде ще значнішим [1]. Експерти вважають, що оцінка та структуризація

бізнес-процесів не тільки підвищить економічну ефективність організацій, але й значно збільшить їхню частку на ринку, конкурентоспроможність і фінансову стабільність, а також сприятиме ефективнішому використанню ресурсів та створенню єдиного інформаційного середовища.

Аналіз останніх досліджень і публікацій.

Багато провідних вітчизняних та міжнародних вчених та фахівців зосередили свої дослідження на бізнес-процесах компаній, включаючи їх моделювання: О. Гусєва, С. Легомінова [2], Д. Ла Торре, К. Колапінто, І. Дурозіні, С. Тріберті [3], Н. Сінгх, С. Чоухан [4]. Л. Лазебник, В. Войтенко [5], О. Яворська [6] наголошувати на тому, що бізнес-процес можна визначити як набір взаємопов'язаних дій, спрямованих на виробництво готової продукції, що вимагає використання певних ресурсів.

Останнім часом, у контексті поширення цифровізації, вітчизняні та закордонні експерти переглянули підхід до вивчення бізнес-процесів. Наприклад, Х. Ларі, К. Вайшнава, К. Ману [7] визначають бізнес-процеси як сукупність основних та допоміжних дій, спрямованих на досягнення цілей, де ключовим аспектом є використання цифрових інструментів.

В роботах: Г. Жосан, Н. Кириченко [8], В. Гришко, І. Зінченко [9], М. Чжан і Ю. Чень [10] розглядаються ключові напрямки розвитку автоматизації технологічних та управлінських процесів в діяльності компаній на основі штучного інтелекту. Тут аналізуються важливі фактори, які впливають на процес впровадження таких систем у роботу підприємств. Автори також надають огляд і опис інформаційних систем, які застосовуються у сучасних компаніях, розглядаючи їхні основні характеристики та склад апаратних та програмних компонентів.

Цікавим для розвитку цієї теми є дослідження Р. Масуд, С. Басахель [11], яке фокусується на вивченні інформаційних систем управління проектом, які впливають не лише на виробничі процеси в аспекті менеджменту, але й на планування за часом.

Постановка завдання. Основною метою дослідження є аналіз впливу штучного інтелекту на бізнес-процеси з метою їх оптимізації та покращення загальної ефективності роботи організацій. Дослідження спрямоване на виявлення ключових аспектів, через які штучний інтелект може сприяти підвищенню продуктивності, зниженню витрат та покращенню якості послуг або продукції.

Завдання дослідження:

– вивчення наявних практик застосування штучного інтелекту в різних галузях бізнесу, а також аналіз успішних кейсів і можливих викликів;

– визначення специфічних сфер бізнесу, де впровадження штучного інтелекту може бути найбільш ефективним;

– надання практичних порад щодо впровадження та налаштування систем штучного інтелекту для досягнення оптимальної продуктивності та ефективності в роботі організацій.

Виклад основного матеріалу. У контексті сучасних ринкових трансформацій, спровокованих спочатку пандемією COVID-19, а потім військовою агресією РФ проти України, тема використання цифрових технологій набуває особливої актуальності. Через необхідність самоізоляції, понад 85% компаній у сфері послуг активно інтегрували цифрові інструменти, такі як мобільні пристрої, вебсайт, хмарні рішення та інші сучасні технології ІІІ у свою діяльність. Ці зміни істотно вплинули на бізнес-стратегії цих організацій. Наприклад, управлінські команди приймали рішення щодо оптимізації вебсайтів, переходу на цифрові канали продажів та доставки з дотриманням заходів безпеки. В цьому контексті, аналіз та структуризація бізнес-процесів у довгостроковій перспективі стають ключовими чинниками для розвитку організацій. Ефективне управління та взаємодія з партнерами, особливо при ухваленні критичних бізнес-рішень, має велике значення. Останні роки продемонстрували, що здатність швидко адаптуватися до онлайн-режиму, впроваджувати інструменти ІІІ надає організаціям значну конкурентну перевагу.

Методика дослідження включає наступні ключові етапи:

1. Теоретичний аналіз сучасного стану цифровізації. Аналіз основних теоретичних підходів до цифровізації, особливо у сфері послуг, та визначення характеристик, що впливають на бізнес-процеси.

2. Емпіричне дослідження. Вивчення практичних прикладів застосування цифрових інструментів у бізнес-процесах, в тому числі використання чат-ботів і штучного інтелекту.

3. Моделювання та аналіз бізнес-процесів. Побудова моделей поточних бізнес-процесів, таких як доставка товарів та роздрібні продажі, та аналіз їх ефективності. Визначення можливостей для оптимізації цих процесів за допомогою цифрових технологій та штучного інтелекту.

4. Оцінка ефективності та розробка рекомендацій. Розробка критеріїв та індикаторів для оцінки ефективності моделювання бізнес-процесів у контексті цифровізації. Розробка алгоритму оцінки ефективності, що включає різні варіанти реалізації кроків та прийняття рішень.

Застосування передових цифрових технологій на основі ШІ відкриває широкі можливості для удосконалення бізнес-процесів через впровадження спеціалізованих систем, що ефективно трансформують та оптимізують їх. Це значно полегшує методи управління та знижує витрати на оптимізацію цих процесів у організаціях [12]. Аналізуючи теоретичні підходи до цифровізації у сфері послуг, можна виділити такі характеристики, що впливають на сучасні бізнес-процеси [6, с. 201]:

- трансформація механізмів самоорганізації та гармонізації системи, заснована на інформатизації бізнес-процесів;
- важливість швидкості як ключового фактора розвитку бізнес-процесів, зумовлена загальнодоступністю інформації та вимогою швидкого реагування, що стимулює застосування програмного забезпечення, вебсайтів, мобільних пристроїв та інших цифрових технологій;
- спрямованість на активне впровадження інновацій у поточні процеси;
- значна роль інтелектуального компонента;

- зростання кількості процесів, які підлягають автоматизації;
- швидке прийняття управлінських рішень на всіх рівнях ієрархії завдяки обробці великих обсягів даних [5].

Здійснене дослідження виявило, що особливості моделювання бізнес-процесів у контексті цифровізації можна зобразити в наступних ключових аспектах (рис. 1).

Отже, цифрові інструменти, такі як програмне забезпечення, вебсайт, хмарні сховища, мобільні застосунки та пристрої, сприяють ефективному зв'язку між учасниками бізнес-процесів. Це сприяє об'єктивності в поданні, обробці та структуруванні інформації, що є важливою складовою для покращення ефективності моделювання бізнес-процесів. Особливості моделювання бізнес-процесів у цифровому контексті включають розширення можливостей фахівців, використання різноманітних цифрових інструментів і технологій, зростання рівня автоматизації процесів та інші аспекти.

Щоб вирішити конкретні проблеми в системах взаємодії між клієнтами та сервісними компаніями, потрібно інтегрувати інформаційні технології, зокрема цифрові комунікаційні системи та технології штучного інтелекту, наприклад чат-боти. Їх ефективність та сприяння зростанню обсягів продажів виправдовують витрати, пов'язані з їх розробкою, підключенням та налаштуванням [11].



Рис. 1. Приклад поточного бізнес-процесу доставки товарної продукції та забезпечення роздрібних продажів компанії

Джерело: побудовано авторами

Значення чат-ботів у сучасному бізнес-середовищі полягає у необхідності для компаній докладати більше зусиль для збереження наявної клієнтської бази, особливо клієнтів, які приносять високий дохід, у відповідь на інтенсивну конкуренцію на ринку. Ефективний розвиток інформаційного управління є ключовим для успіху компанії, оскільки воно включає регулювання різних видів її інформаційної діяльності. У сучасному великомасштабному інформаційному просторі ручне управління великими обсягами даних стає складним і ресурсомістким процесом для організації. Ці питання здатні вирішувати програмні інструменти ШІ, такі як чат-боти, які включають [7, 8]:

- інтеграцію різноманітних комунікаційних каналів у єдину систему;
- зменшення витрат на телефонні дзвінки та SMS-повідомлення;
- здатність збирати детальну статистику відносин з клієнтами;
- уникнення необхідності повторної автентифікації клієнтів;
- підвищення відсотка перегляду повідомлень у порівнянні з електронними розсилками;
- збільшення продуктивності клієнт-менеджерів;
- підвищення конверсії продажів.

Клієнти також отримують переваги від використання віртуальних помічників, які включають:

- швидкість та якість обслуговування;
- можливість обирати зручний канал спілкування;
- доступ до релевантної та детальної інформації за інтересом;
- наочне анімоване навчання для використання платформи;
- можливість запитувати інформацію, що цікавить, у будь-який час доби.

Віртуальний помічник, створений на базі пошукової моделі, використовує заздалегідь визначені відповіді зі свого репозиторію, на відміну від генеративних моделей, здатних створювати нові відповіді, які не зустрічалися раніше. Більшість сучасних виробничих систем базуються або на пошуковій моделі, або на поєднанні пошукової та генеративної моделей. Хорошим прикладом такої системи є Розумна Відповідь від Google. Генеративні моделі активно досліджуються, проте вони ще не досягли стадії повноцінного використання. Для створення діалогового агента сьогодні найбільш слушним вибором буде пошукова модель [13].

Діалоговий корпус Ubuntu (Ubuntu Dialog Corpus, UDC) є одним із найбільших відкритих наборів даних для діалогів на основі ШІ. Він створений на основі архівів чатів з каналів Ubuntu в загальнодоступній мережі IRC. Набір даних для навчання включає 1 мільйон прикладів, половина з яких позитивно маркована (мітка 1), а інша половина – негативно (мітка 0). Кожен приклад складається з контексту розмови до цього моменту і висловлювання, що є відповіддю на контекст [10]. Позитивна мітка позначає, що висловлювання було реальною відповіддю на контекст, тоді як негативна – що висловлювання було обрано випадково з корпусу. Приклади таких даних представлені на рис. 2.

Скрипт для створення набору даних вже провів значну попередню обробку, включаючи токенизацію, структурування та лематизацію тексту за допомогою інструменту NLTK. Він також замінив певні елементи, такі як імена, місцеположення, назви організацій, URL-адреси та системні шляхи, на спеціальні токени. Хоча ця попередня обробка не є обов'язковою, вона може збільшити ефективність на кілька відсотків. Середня довжина контексту становить 86 слів, тоді як середній вислів має 17 слів. Використання Jupyter Notebook дозволяє детально аналізувати ці дані.

Набір даних включає тестові та перевірочні комплекти, які мають формат, відмінний від навчальних даних. Кожен запис у тестовому або перевірочному комплекті містить контекст, одне правильне висловлювання (реальна відповідь) та 9 невірних висловлювань, які використовуються як відволікаючі фактори [14]. Завдання моделі полягає у тому, щоб присвоїти найвищий рейтинг правильному висловлюванню і нижчі оцінки неправильним висловлюванням (рис. 3).

Існує кілька підходів до оцінки ефективності моделі. Поширеною метрикою є $recall@k$, що дозволяє моделі обирати k найкращих відповідей з 10 можливих (1 правильна і 9 відволікаючих). Якщо правильна відповідь знаходиться серед обраних k , тестовий приклад вважається успішним. Збільшення k спрощує завдання для моделі. Наприклад, при $k = 10$, $recall$ буде 100%, оскільки серед 10 відповідей завжди знайдеться правильна. При $k = 1$ модель має лише одну спробу вибрати правильну відповідь.

Цікавим є питання, як обиралися 9 відволікаючих факторів у цьому наборі даних. У цьому випадку вони були вибрані випадково. Проте в реальному світі може бути мільйони потенційних відповідей, і не відомо, яка з них є правиль-

```
In [62]: pd.options.display.max_colwidth = 500
train_df.head()
```

Context	Utterance	Label
0 i think we could import the old comment via rsync , but from there we need to go via email . i think it be easier than each the status on each bug and than import bite here and there ... it would be veri easi to keep a hash db of message-id ... sound good ... ok ... perhaps we can ship an ad-hoc apt_preferenc ... version ? ... thank ... not yet ... it be cover by your insur ? ... yes ... but it 's realli no...	basic each xfree86 upload will not forc user to upgrad 100mb of font for noth ... no someth i do in my spare time ...	1
1 i 'm not suggest all - onli the one you modifi ... ok , it sound like you re agre with me , then ... though rather than " the one we modifi " , my idea be " the one we need to merg "	sorri ... i think it be ubuntu relat ...	0
2 afternoon all ... not entir relat to warti , but if grub-install take 5 minut to instal , be this a sign that i should just retri the instal :) ... here ... you might want to know that thinic in warti be buggi compar to that in sid ... and appar gnome be suddant almost perfect (out of the thinic problem) , nobodi report bug : - p ... i do n't get your question , where do you want to past ? ... can i file the panel not link to ad ? ;) ...	yep ... oh , okay . i wonder what happen to you ... what distro do you need ? ... yes ...	0
3 interest ... grub-install work with / be ext3 , fail when it be xfs ... i think d-i instal the relev kernel for your machin . i have a p4 and it instal the 386 kernel ... holi crap a lot of stuff get instal by default :) ... you be instal vim on a box of mine ... ;) ... more like osx than debian ;) ... we have a select of python modul avail for great justic (and python develop) ... 2.8 be fix them irc ... ping ... vino will...	that the one ...	1
4 and becaus python give mark a woodi ... i 'm not sure if we re mean to talk about that public yet and i think we be a " pant off " kind of compani ... ; p ... you need new glass ... _eot_ mono 1.0 ? dude , that 's go to be a barrel of laugh for total non-releas relat reason dure hoari ... read bryan clark 's entri about networkmanag ? ... there be an accompani irc convers to that one < g > ... _eot_ explain ? ... i guess you could s...	(i think someone be go to make a joke about .au bandwidth ...) ... especi not if you re use screen ;) ...	1

Рис. 2. Програмний скрипт чат-бота, зразок

Джерело: розроблено авторами

```
In [66]: pd.options.display.max_colwidth = 500
test_df.head()
```

Context	Ground Truth Utterance	Distractor_0	Distractor_1	Dis
0 anyone know whi my stock oneir export env var usernam ? i mean what be that use for ? i know of userbutnot usernam . my precis instal doe n't export usernam ... look like it use to be export by lightdm , but the line have the comment " // fixm : be this requir ? " so i guess it be n't surpris it be go ... thank i how the heck do you figur that out ? ... https : //bugs.launchpad.net/lightdm/+bug/864109/comments/3 ...	nice thank ! ...	wrong channel for it , but check efnet.org , unoffici page ...	everi time the kernel chang , you will lose video ... yep ...	ok

Рис. 3. Аналіз набору даних текстів та перевірок, зразок

Джерело: розроблено авторами

ною. Оцінювати мільйон можливих відповідей для вибору найкращої було б надто складно та затратно. Google Smart Reply використовує методи кластеризації для визначення набору можливих відповідей. У випадку, коли є лише кілька сотень потенційних відповідей, можна оцінити їх усі [3].

Чат-бот – це програма, що здатна вести реальний діалог з користувачем. Є чат-боти з обмеженим функціоналом (закритим доменом) та чат-боти з розширеним функціоналом (відкритим доменом або генеративні). Чат-боти з обмеженим функціоналом працюють на основі заздалегідь запрограмованих відповідей. Своєю чергою, генеративні чат-боти створюють відповіді самостійно.

Модель seq2seq, також відома як модель кодувальника-розкодувальника, використовує механізм довготривалої короткочасної пам'яті (LSTM) для створення текстів на основі навчального корпусу. Ця модель також є корисною в програмах машинного перекладу. Простими словами, модель seq2seq прогнозує слово, введене користувачем, а далі кожне наступне слово передбачається на основі ймовірності його появи [15]. При створенні нашого генеративного чат-бота ми використовуємо цей метод для генерації тексту на запит користувача (рис. 4).

Енкодер генерує останній вектор стану (пам'яті), який використовується як початковий стан для декодера. У процесі навчання декодера ми застосовуємо

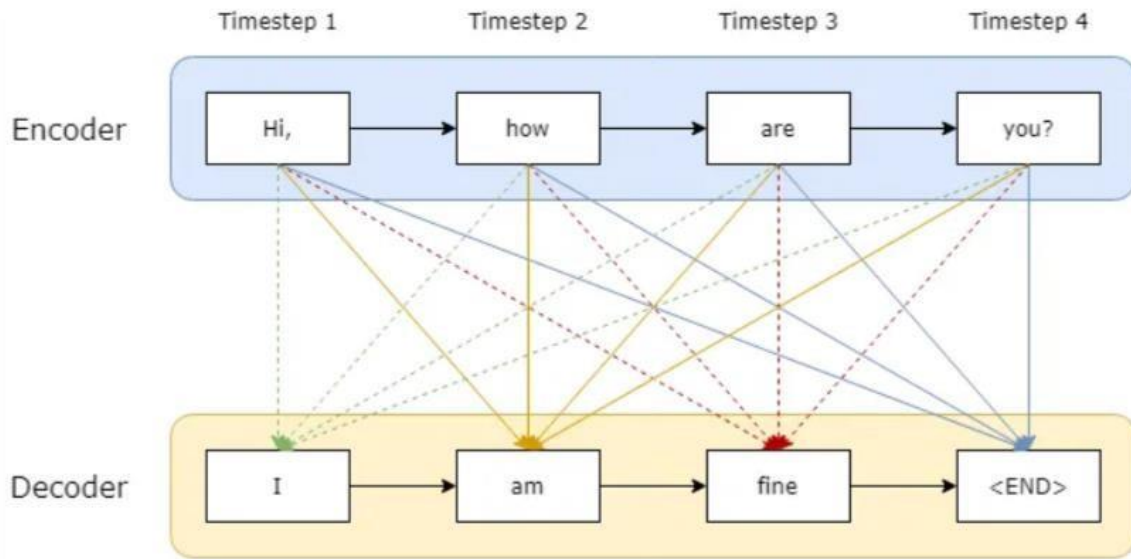


Рис. 4. Модель нейронної мережі seq2seq управління бізнес-процесом організації

Джерело: розроблено авторами

метод, відомий як “teacher forcing”, який допомагає декодеру передбачати наступні слова в цільовій послідовності на основі попередніх слів [13]. Як було зазначено, стан передається від енкодера до кожного рівня декодера. Слова «Привіт», «як», «є» та «ви» є вхідними токенами, тоді як «я» та «добре» є цільовими токенами. Ймовірність токена «я» залежить від попередніх слів і станів, сформованих енкодером. Токен “<END>” додається, щоб сигналізувати декодеру про закінчення послідовності.

У контексті цифровізації, бізнес-процеси компанії потребують оцінки з точки зору їх ефективності та доцільності впровадження та моделювання (рис. 5).

Ключовим елементом у розробленій методиці є аналіз моделювання бізнес-процесів організацій з огляду на цифровізацію. Зазвичай компанії у сфері послуг розглядають свої бізнес-процеси в рамках чотирьох основних категорій [16]:

- 1) розробка продуктів та послуг;
- 2) створення попиту;
- 3) задоволення попиту;
- 4) планування та управління підприємством.

У своїй роботі автор визначив ключові індикатори ефективності моделювання бізнес-процесів компанії у контексті цифровізації (див. табл. 1).

Розроблена методика оцінки ефективності моделювання бізнес-процесів на основі ШІ в умовах цифровізації передбачає детальну схему, включаючи різні варіанти реалізації кроків та прийняття рішень, враховуючи як позитивні, так і негативні сценарії їх розвитку, що відображено на графіках [4].

Представлений алгоритм оцінки ефективності можна умовно розділити на кілька етапів, де за результатами оцінки ключових показників передбачено проведення проміжного контролю результатів з подальшою корекцією бізнес-процесу. Наприклад, якщо на початковій стадії виявляється, що бізнес-процес не є прибутковим, то оцінка ефективності використання робочої сили втрачає своє значення, так само як і оцінка участі грошових активів бізнес-процесів у загальній величині оборотних активів організації та інші аспекти.

Висновки. У контексті швидкого розвитку цифровізації спостерігається її благотворний вплив на процес моделювання бізнес-процесів в організаціях. Було підтверджено, що цифрові технології сприяють ефективному зв'язку між учасниками бізнес-процесів, забезпечуючи точність у подачі, обробці та систематизації інформації, що підвищує ефективність моделювання бізнес-процесів. Зазначено, що застосування цифрових інструментів та технологій у моделюванні бізнес-процесів дозволяє підвищити рівень розвитку та конкурентоспроможності компаній у своїх галузях.

Одне з ключових рішень полягає у створенні єдиної цифрової платформи, яка дозволить спільне планування ресурсів, контроль термінів та завдань, а також візуалізацію даних на аналітичних дашбордах із вбудованим онлайн чат-ботом, оснащеним нейронними мережами для підвищення ефективності роботи клієнт-менеджерів. Проведений аналіз сприяв створенню

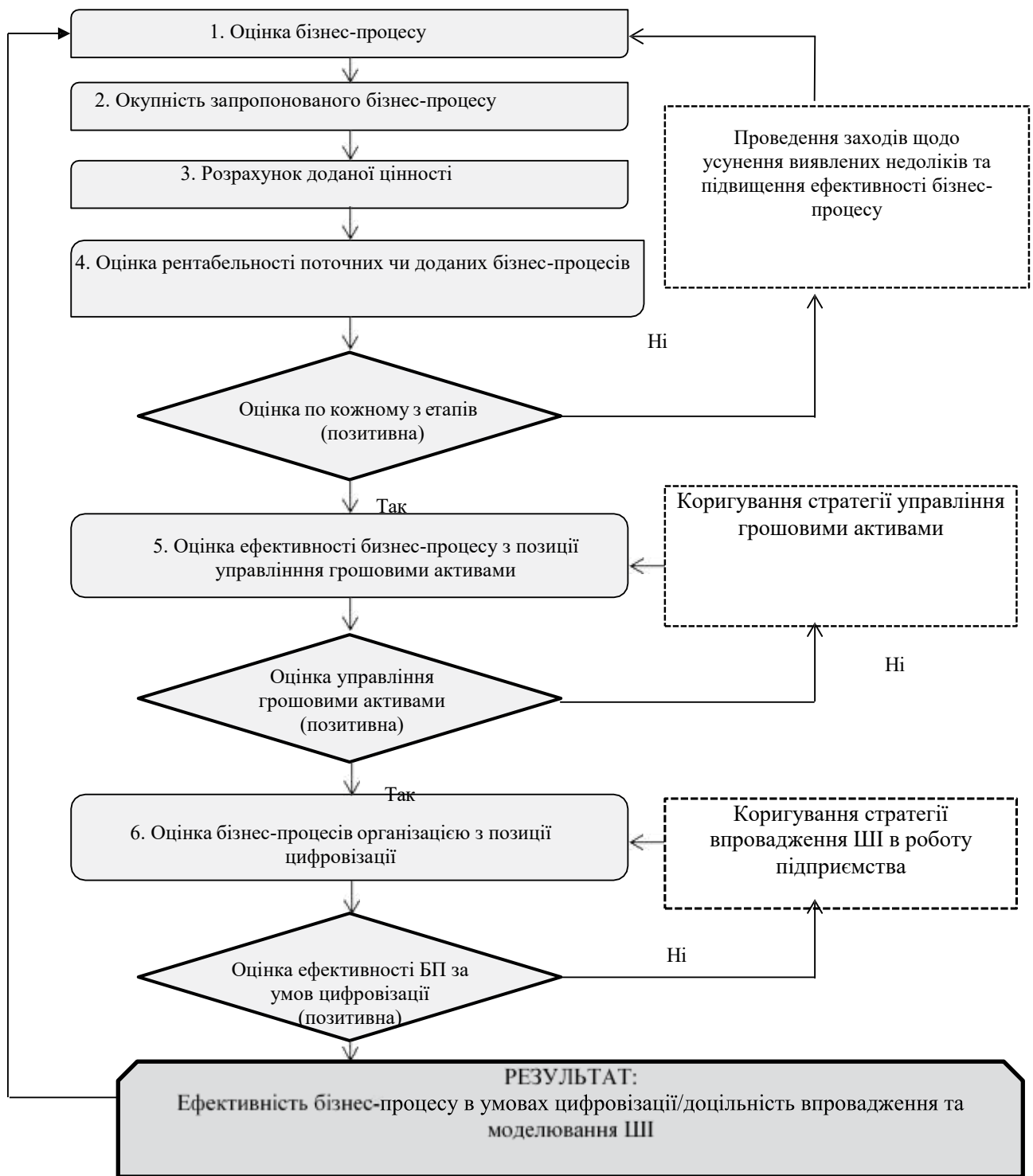


Рис. 5. Алгоритм оцінки ефективності моделювання бізнес-процесів компанії в умовах цифровізації
 Джерело: складено авторами

технології моделювання бізнес-процесів компанії з урахуванням аспектів ІІІ. Розроблена технологія визначається як універсальний процес аналізу, оцінки та впровадження процесів з використанням відповідних інструментів та підходів

для досягнення поставленої мети, формування конкурентного середовища на ринку, відповідності світовим стандартам та покращення якості бізнес-середовища відповідно до поточних ринкових тенденцій.

Показники ефективності моделювання бізнес-процесів компанії в умовах цифровізації [2, 9]

Найменування показника (позначення)	Роль показника у підвищенні ефективності моделювання бізнес-процесів компанії в умовах цифровізації
Кількість використовуваних цифрових технологій	Впливає на зростання ефективності підприємства, моделювання окремих бізнес-процесів (наприклад, на зростання прибутку), на рівень конкурентоспроможності підприємства у цифровому середовищі, на приріст ринкової частки
Виручка від цифровізації (наприклад, від реалізації товарів через сайт)	Впливає на економічну рентабельність від цифровізації, її приріст, задоволення потреб ринку, зокрема – покупців (клієнтів)
Організаційні та управлінські витрати на цифрові інструменти та технології	Впливає на кількість і якість використовуваних інструментів та технологій, конкурентоспроможність підприємства у цифровому середовищі, на приріст ринкової частки, прибуток від їх використання
Компетентність керівництва у питаннях цифровізації бізнес-процесів компанії	Впливає на якість прийнятих рішень, на отриманий результат, на конкурентоспроможність кадрів у цих питаннях, на ступінь інформатизації досліджуваних процесів
Інформативність бізнес-процесів компанії в умовах цифровізації	
Охоплення аудиторії застосовуваними бізнес-процесами	Впливає на якість моделювання бізнес-процесів, на їхню клієнтоорієнтованість, на популярність компанії. За допомогою використовуваних бізнес-процесів (наприклад, реалізацію товарів на сайті), на долю компанії на споживчому ринку

Список літератури:

- Makedon V., Dzeveluk A., Khaustova Y., Bieliakova O., Nazarenko I. Enterprise multi-level energy efficiency management system development. *International Journal of Energy, Environment, and Economics*. 2021. Volume 29. Issue 1. pp. 73–91.
- Гусєва О.Ю., Легомінова С.В. Диджиталізація – як інструмент удосконалення бізнес-процесів, їх оптимізація. *Економіка. Менеджмент. Бізнес*. 2018. № 1(23). С. 33–39.
- La Torre D., Colapinto C., Durosini I., Triberti S. Team Formation for Human-Artificial Intelligence Collaboration in the Workplace: A Goal Programming Model to Foster Organizational Change. *IEEE Transactions on Engineering Management*. 2023. Volume 70. Issue: 5. pp. 1966–1976. DOI: <https://doi.org/10.1109/TEM.2021.3077195>.
- Singh N., Chouhan S.S. Role of Artificial Intelligence for Development of Intelligent Business Systems. *IEEE International Symposium on Smart Electronic Systems (iSES)*. Jaipur, 2021. P. 373–377. DOI: <https://dx.doi.org/10.36227/techrxiv.16676794.v1>.
- Лазебник Л.Л., Войтенко В.О. Інформаційна інфраструктура в цифровізації бізнес-процесів підприємства. *Науковий вісник Міжнародного гуманітарного університету*. 2020. Випуск 42. С. 18–22. Режим доступу: <http://www.vestnikesonom.mgu.od.ua/journal/2020/42-2020/5.pdf%20> (дата звернення: 16.01.2024).
- Яворська О.Г. Цифровізація бізнесу та електронна комерція – тренди трансформації сервіс-орієнтованих підприємств. *Парадигмальні виклики сучасного розвитку*: колективна монографія. Чернігів: ГО «Науково-освітній інноваційний центр суспільних трансформацій», 2022. С. 186–205. URL: https://reicst.com.ua/asp/article/view/monograph_paradigmatic_03_2022_05_01 (дата звернення: 16.01.2024).
- Lari H., Vaishnava K., Manu K. Artificial Intelligence in E-Commerce: Applications, Implications and Challenges. *Asian Journal of Management*. 2022. Vol. 13. Iss. 3. pp. 235–244. DOI: 10.52711/2321-5763.2022.00041.
- Жосан Г.В., Кириченко Н.В. Управління цифровізацією бізнес-процесів діяльності підприємства. *Economic synergy*. 2022. № 4. с. 82–91.
- Hryshko V., Zinchenko I. Synergy of AI and business as a factor of management efficiency in the context of technology development. *Science Journal «Economics and Region»*. 2023. Vol. 4(91). pp. 223–229. DOI: [https://doi.org/10.26906/EiR.2023.4\(91\).3216](https://doi.org/10.26906/EiR.2023.4(91).3216).
- Zhang M., Chen Y. Link prediction based on graph neural networks. *Advances in Neural Information Processing Systems*: 32nd Conference on Neural Information Processing Systems, NeurIPS 2018, Montréal, December 3–8, 2018. Montréal, Canada, 2018. P. 5171–5181.
- Masoud R., Basahel S. The Effects of Digital Transformation on Firm Performance: *The Role of Customer Experience and IT Innovation*. Digital 2023. № 3. pp. 109–126. DOI: <https://doi.org/10.3390/digital3020008>.

12. Shelukhin M., Kupriichuk V., Kyrylko N., Makedon V., Chupryna N. Entrepreneurship Education with the Use of a Cloud-Oriented Educational Environment. *International Journal of Entrepreneurship*. 2021. Volume 25. Issue 6. Available at: <https://www.abacademies.org/articles/entrepreneurship-education-with-the-use-of-a-cloudoriented-educational-environment-11980.html> 20 (accessed: 16.01.2024).

13. Вербівська Л.В. Застосування інструментів штучного інтелекту при управлінні конкурентоспроможністю підприємства. *Проблеми сучасних трансформацій. Серія: економіка та управління*. 2023. №(10). DOI: <https://doi.org/10.54929/2786-5738-2023-10-04-06>.

14. Македон В.В., Чабаненко А.В. Факторні складові цифровізації глобальної економіки та макроекономічних систем країн світу. *Ефективна економіка*. 2022. № 1. DOI: 10.32702/2307-2105-2022.1.11.

15. Дзямулич М.І., Шматковська Т.О. Вплив сучасних інформаційних систем і технологій на формування цифрової економіки. *Економічний форум*. 2022. № 2. С. 3–8.

16. Краковецький О. Перегони штучного інтелекту: що таке ChatGPT і кому він може стати в пригоді. *Mind*. 2023. Режим доступу: <https://mind.ua/openmind/20252628-peregoni-shtuchnogo-intelektu-shcho-takechatgpt-i-komu-vin-mozhe-stati-v-prigodi> (дата звернення: 16.01.2024).

Chernyshova O.O., Domashenko S.V., Domashenko D.H. THE INFLUENCE OF ARTIFICIAL INTELLIGENCE ON BUSINESS PROCESSES WITH THE PURPOSE OF OPTIMIZING AND IMPROVING THE EFFICIENCY OF THE ORGANIZATION

In the conditions of global challenges caused by the COVID-19 pandemic and the military aggression of the Russian Federation against Ukraine, the need for digital transformation of business is becoming urgent. It is digital technologies, in particular, artificial intelligence (AI), mobile applications, cloud solutions and integrated websites, that are becoming crucial tools to support the work of more than 85% of companies in the service sector during self-isolation. These technologies not only ensure uninterrupted operations in new conditions, but also open up new opportunities for the development and optimization of business processes.

The authors of the study indicate that digitalization in the service sector has significantly transformed traditional approaches to management, sales and interaction with customers. The use of digital tools makes it possible to significantly reduce costs, increase the efficiency of management processes and at the same time expand the possibilities for adaptation to changing market conditions. Chatbots and other AI tools provide fast and high-quality customer service, increase sales and improve interaction with the customer base. The research methodology covers a theoretical analysis of the current state of digitization, an empirical study of the use of digital tools in practice, modeling of business processes using digital technologies, as well as performance evaluation and development of recommendations for optimization. The results show that digitalization affects all aspects of companies' activities, from managing business processes to interacting with customers. Special attention is paid to the role of chatbots and other AI tools that simplify communication with customers, automate the processing of requests and increase the level of customer service satisfaction. The use of these technologies allows companies to remain competitive in a rapidly changing market. The study also highlights the importance of leadership competencies in digitalization, as effective implementation of digital innovation requires a deep understanding of current and future trends in technology and the market. Thus, the ability of companies to adapt to the digital economy and use digital tools to optimize business processes becomes a key factor in their success and development.

Key words: *business processes, informatization of business processes, digitalization, artificial intelligence, script, chatbot.*

ЕНЕРГЕТИКА

УДК 621.928

DOI <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2024.2/28>**Риндюк Д.В.**Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»**Степанченко А.А.**Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

ВИЗНАЧЕННЯ ОПТИМАЛЬНИХ КОНСТРУКТИВНИХ ПАРАМЕТРІВ ПОВІТРЯНОГО ЦИКЛОНА ДЛЯ ГАЗОГЕНЕРАТОРА МАЛОЇ ПОТУЖНОСТІ

В умовах складної економічної та політичної ситуації, що має місце в Україні, для невеликих приватних домогосподарств і мешканців сільської місцевості актуальним є використання альтернативних технологій отримання теплової та електричної енергії. Доцільним і недорогим варіантом може стати технологія газифікації біопалива. Її використання є обґрунтованим з точки зору використання в системах енергопостачання малої потужності. Для отримання електроенергії на основі генераторного газу необхідне його якісне очищення перед використанням в двигунах внутрішнього згоряння генераторів. Найбільш простим способом очистки генераторного газу від механічних домішок є застосування сухих методів очистки, в першу чергу циклонів. Проте при конструюванні газогенераторних установок малої потужності (до 40 м³/год газу) виникають значні проблеми з вибором конструкції та типорозмірів циклонів. Ефективність очистки генераторного газу циклонами, конструктивно-технологічні параметри яких обрано за класичних методів розрахунку, має низьку результативність.

Зважаючи на відсутність достовірної методики для розрахунку геометричних розмірів циклонів малої потужності, створено математичну модель процесу фільтрації генераторного газу в інерційному циклоні. Обрано перелік основних геометричних параметрів циклону. Використовуючи метод випадкового балансу, проведено відсіюючі експерименти з метою визначенні величини впливу конкретних параметрів на ефективність очистки генераторного газу від механічних домішок. Виділено геометричні параметри, що здійснюють основний вплив. Проведено комплекс основних числових експериментів спрямованих на визначення оптимальних геометричних співвідношень основних розмірів циклону. Як цільову функцію задачі оптимізації обрано якість очищення η , % генераторного газу від механічних домішок. Отримано залежність впливу основних геометричних параметрів циклона на якість очистки генераторного газу від механічних домішок. Визначено оптимальний розподіл основних геометричних параметрів для циклона малої продуктивності.

Ключові слова: генераторний газ, механічні домішки, циклон, математичне моделювання, оптимізація.

Постановка проблеми. Процес термохімічної конверсії біомаси з метою отримання газоподібного палива досить відомий та неодноразово досліджений. Проте дані технології не набули широкого розповсюдження в світі. Але в сучасних умовах технології газифікації стрімко розвиваються та їхнє застосування стає все більш обґрунтованим.

Особливої актуальності вони набувають в складній економічній та політичній ситуації, що

має місце в Україні. Повномасштабна військова агресія росії внесла значні корективи в розуміння проблеми забезпечення цивільного населення мінімально достатніми умовами проживання [1, с. 12].

Через значне зростання цін на традиційні паливні енергоресурси, постійні ракетні обстріли енергетичних об'єктів, що призводять до нестабільності забезпечення громадян теплом та електричною енергією на перше місце

виступають альтернативні шляхи подолання цієї проблеми [2, с. 2].

Використання електрогенераторів, що працюють на традиційному паливі (бензині, газі, дизелі) є досить дорогим через значне зростання ціни внаслідок проблем з імпортом [3, с. 1].

Для невеликих приватних господарств та населення сільської місцевості доцільно використовувати альтернативні джерела отримання енергії такі, як біопаливо (деревина, паливні брикети, торф, паливні гранули).

Технологія газогенерації на основі термохімічної конверсії біомаси є досить ефективною для отримання газоподібного палива (синтез-газ), що може бути використано в класичних електрогенераторах [4, с. 17]. Проте для отримання електроенергії на основі генераторного газу необхідне його якісне очищення перед використанням в двигунах внутрішнього згоряння генераторів. Найбільш простим способом очистки генераторного газу від механічних домішок є застосування сухих методів очистки, в першу чергу циклонів.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Проблема очистки газів та повітря від механічних домішок гостро стоїть перед багатьма галузями народного господарства.

Так у праці [5, с. 152] авторами представлено результати дослідження ефективності процесу очищення повітряного потоку від деревного пилу та вивчено вплив конструктивних параметрів циклона на процес очищення запиленого потоку повітря. Розглянуто циклон середньої продуктивності з основним діаметром 600 мм та зроблено висновок про доцільність збільшення циліндричної частини циклона.

Робота [6, с. 101] присвячена дослідженню впливу геометричних розмірів циліндричної частини циклона та глибини занурення вихлопної труби на основні експлуатаційні характеристики апарата на основі теоретичних та експериментальних досліджень. Авторами порівняно отримані результати з відомими теоріями пиловловлення. Відмічено, що класичні теорії не враховують у повній мірі геометрію циклона, а розглядають рух частинки пилу тільки в циліндричній частині циклона. Зроблено висновок, що збільшення величини занурення вихлопної труби призводить до підвищення гідравлічного опору циклона.

Збільшенню ефективності роботи центробіжних пиловловників на гірничому виробництві присвячена робота [7, с. 91]. Авторами проведено математичне моделювання процесу пиловловлення та наведено розподіли швидкостей та

густини потоку в вхідній частині циклону, що дозволяють підбирати на стадії проектування раціональні параметри циклонних апаратів.

Варто відмітити, що використання математичного моделювання при дослідженні руху потоків рідини або газу є досить зручним та надійним способом аналізу процесів, що відбуваються в енергетичному обладнанні. Так в роботі [8, с. 193] висвітлено підхід до моделювання поведінки вологого пара в паропроводі енергоблоку з урахуванням крапель рідкої фази, елементи наведеної методики доцільно використати й для моделювання поведінки газу в циклоні.

Для отримання електроенергії в досліджуваній установці використовується двигун внутрішнього згоряння в поєднанні з генератором. Паливом для ДВЗ є генераторний газ, що на виході з газогенератора має досить значну температуру 400–700 °С (в залежності від типу сировини) та високий вміст механічних домішок (до 100 г/м³) таких, як пил, зола та сажа. Також значну проблему викликає забруднення генераторного газу смолами [9, с. 72].

Найбільш простим та часто вживаним для очистки генераторного газу від механічних домішок є застосування двоступеневих систем, що складаються з фільтра грубої (попередньої) очистки та тонкої (остаточної) очистки. Для попередньої очистки в більшості випадків використовуються сухі методи очистки, в першу чергу циклони. Це пояснюється тим, що інерційний (з використанням відцентрової сили) принцип є досить простим та ефективним способом уловлення твердих механічних домішок з високим ступенем очищення газу, невисоким аеродинамічним опором системи, простотою конструкції та невисокою вартістю обладнання.

Циклонні пиловловлювачі складають найбільш масову групу серед усіх видів пиловловлюючої апаратури та застосовуються у всіх галузях промисловості.

Проте, при експлуатації газогенераторних установок малої потужності (до 40 м³/год газу) виникають значні проблеми саме з вибором конструкції та типорозмірів циклонних фільтрів. Класичні методи розрахунку та підбору циклонів [10, с. 527; 11, с. 130] призначені та дають адекватні результати тільки для пристроїв середньої та великої продуктивності.

Не зважаючи на важливість очищення генераторного газу від механічних домішок, дослідженням спрямованих на раціоналізацію конструкцій циклонних систем для газогенераторів малої про-

дуктивності, що забезпечують роботу ДВЗ присвячено недостатньо уваги.

Постановка завдання. Метою статті є проведення таких досліджень, а саме вивчення особливостей системи інерційного очищення генераторного газу отриманого з біопалива та оптимізація конструктивних параметрів обладнання з метою розробки циклона раціональної конструкції для газогенераторів малої потужності.

Виклад основного матеріалу. Розглянуто класичний циклон основними елементами якого є корпус, вихідна труба та бункер. Генераторний газ надходить у верхню частину корпусу, через вхідний патрубок, приварений до корпусу тангенційно. Уловлювання механічних домішок (пилу, золи та сажі) відбувається під дією відцентрової сили, що виникає при обертвовому русі газу між корпусом і вихідною трубою. Уловлені тверді дисперсні частки зсипаються в бункер, а очищений газ викидається через вихідну трубу. Ефективність очищення газу циклонами залежить від їх типу та співвідношення основних розмірів.

Залежно від конструкції циклонів мають різні кути нахилу завихрювачів, різні співвідношення внутрішнього діаметра до їх довжини, ширини та висоти вхідного патрубку, висоти циліндричної та конічної частин циклону, діаметру вихідної труби та інших визначальних розмірів. Всі ці співвідношення впливають на технічні характеристики циклонів, такі як: продуктивність, питомі енерговитрати, ефективність уловлювання пилу, фракційний склад уловлюваного пилу, втрати тиску в апараті.

Зважаючи на відсутність достовірної методики для розрахунку співвідношень вказаних вище геометричних характеристик для циклонів малої потужності (до 40 м³/год), прийнято рішення про доцільність створення математичної моделі процесу фільтрації генераторного газу в інерційному циклоні класичної конструкції та проведення комплексу числових експериментів спрямованих на визначення оптимальних геометричних співвідношень основних розмірів циклону для максимальної якості очищення генераторного газу від механічних домішок.

Наведемо базові закономірності, що є основою математичної моделі руху частинки (пил, зола, сажа) в потоці стисливої рідини (генераторного газу).

Для моделювання течій генераторного газу в циклоні використовувалися усереднені за Фавром рівняння Нав'є-Стокса [12, с. 125], де враховуються усереднені за часом впливи турбулентності потоку на параметри потоку, а також рівняння

переносу для турбулентної кінетичної енергії та швидкості її дисипації (k-ε модель).

Поставлена задача розглядалася як течія двофазних потоків де одна фаза (тверді частинки) рухаються у стаціонарному полі потоку другої (газової) фази. При цьому припускається, що вплив твердих частинок на потік газу (включаючи температуру) є незначним. Також вважалося, що масова витрата твердої фази (частинок) повинна бути не більше ніж 30% від масової витрати газової фази.

Для моделювання таких двофазних потоків, де потік газу забруднено частинками, використовувався підхід Лагранжа [13, с. 107].

Частинки твердого матеріалу вважалися сферичними та такими, що мають постійну масу. Траєкторії частинок визначалися шляхом чисельного інтегрування рівняння:

$$m_{\text{част}} \frac{d\vec{U}_{\text{част}}}{dt} = \frac{1}{8} \pi \mu d \operatorname{Re} C_{on} (\vec{U} - \vec{U}_{\text{част}}) - \frac{1}{6} \pi d^3 \nabla P + m_{\text{част}} \vec{g}$$

де $m_{\text{част}}$ – маса частинки, $\vec{U}_{\text{част}}$ – вектор швидкості частинки, μ – коефіцієнт динамічної в'язкості, d – діаметр частинки, C_{on} – коефіцієнт опору частинки, \vec{g} – вектор гравітаційного прискорення, Re – число Рейнольдса, яке залежить від діаметра частинки, відносної швидкості, густини та в'язкості потоку.

Коефіцієнт опору частинок C_{on} розраховувався за формулою Хендерсона [14, с. 707], отриманою для безперервних, розріджених, дозвукових ($M \leq 1$) ламінарних, перехідних і турбулентних потоків, що діють на частинки. Також враховано різниці температур між генераторним газом і частинкою. Обертання частинок, їх взаємодія одна з одною та броунівський рух не враховуються.

$$C_{on} = 24 \left[\operatorname{Re} + S \left(4.33 + \frac{3.65 - 1.53 \frac{T_{\text{част}}}{T}}{1 + 0.353 \frac{T_{\text{част}}}{T}} \exp(-0.247 \frac{\operatorname{Re}}{S}) \right) \right]^{-1} + \exp\left(-\frac{0.5M}{\sqrt{\operatorname{Re}}}\right) \times \left[\frac{4.5 + 0.38(0.03 \operatorname{Re} + 0.48 \sqrt{\operatorname{Re}})}{1 + 0.03 \operatorname{Re} + 0.48 \sqrt{\operatorname{Re}}} + 0.1M^2 + 0.2M^8 \right] + \left[1 - \exp\left(-\frac{M}{\operatorname{Re}}\right) \right] 0.6S$$

де M – число Маха, що базується на відносній швидкості між частинкою і потоком газу,

$S = M \sqrt{\frac{\gamma}{2}}$ – відношення молекулярних швидкостей, γ – питома теплоємність, T – температура газу у потоці, $T_{\text{част}}$ – температура частинок.

Рівняння теплової енергії для частинки мало наступний вигляд:

$$m_{\text{част}} C_{\text{част}} \frac{dT_{\text{част}}}{dt} = \pi d \cdot k \cdot \operatorname{Nu} (T - T_{\text{част}}),$$

де $C_{част}$ – питома теплоємність частинки, $T_{част}$ – температура частинки, k – теплопровідність газу, Nu – число Нуссельта.

Коефіцієнт теплопередачі між частинкою та газом розраховувався за формулою запропонованою в [15, с. 1980]:

$$Nu = \frac{2 + 0,459 Re^{0,55} Pr^{0,33}}{1 + 3,42 \frac{M}{Re Pr} (2 + 0,459 Re^{0,55} Pr^{0,33})}$$

Також враховувалася сила тяжіння. Оскільки маса частинок вважалася постійною, частинки, охолоджені або нагріті навколишнім газом, змінювали свій розмір.

Взаємодія частинок з внутрішніми поверхнями стінок циклона враховувалася шляхом визначення неідеального відбиття (що є типовим для таких механічних домішок, як пил та зола). Неідеальне відбиття визначалося нормальним e_N та тангенціальним e_τ коефіцієнтами відбивання частинок:

$$e_N = \frac{V_{2,N}}{V_{1,N}}, \quad e_\tau = \frac{V_{2,\tau}}{V_{1,\tau}},$$

де $V_{2,N}$ і $V_{2,\tau}$ – нормальна та тангенціальна складові швидкості частинки після зіткнення, а $V_{1,N}$ та $V_{1,\tau}$ до зіткнення.

Вирішення поставленої задачі визначення оптимальних геометричних співвідношень основних розмірів циклону запропоновано здійснити за допомогою проведення активного числового експерименту.

Першим етапом є планування активного експерименту з метою отримання нормалізованого вигляду функції відгуку процесу:

$$Y = f(X_1, X_2, \dots, X_n),$$

де X_1, X_2, \dots, X_n – найсуттєвіші вхідні фактори процесу, які можна варіювати в запланованих інтервалах при реалізації експерименту на математичній моделі циклона.

Оптимальне значення функції відгуку та відповідні йому значення вхідних факторів, які забезпечують такий екстремум функції відгуку й будуть шуканим розв'язком задачі оптимізації.

Як цільову функцію задачі оптимізації обрано ефективність очистки газу від дрібнодисперсних механічних домішок (пил, зола, сажа) в циклоні.

Необхідно вирішити питання – які саме конструктивні (геометричні) фактори впливають на шукану функцію.

В промисловості найбільше розповсюдження набули циклони типу ЦН, СДК-ЦН та СК-ЦН, що мають схожу конструкцію та відрізняються різними пропорціями основних геометричних

розмірів. Виробники рекомендують використовувати для очистки димових газів котелень від механічних домішок циклони типу СДК-ЦН, що краще пристосовані для уловлення дрібнодисперсних частинок золи та сажі з розміром фракції 5–10 мкм завдяки видовженій конусній частині циклона. Проте не існує стандартних типорозмірів таких циклонів надмалої продуктивності (до 40 м³/год). Найменші з циклонів типу СДК-ЦН, що виробляються серійно мають продуктивність більше 100 м³/год та основний діаметр, що перевищує 150 мм.

При використанні класичної залежності з визначення конструктивних розмірів циклонів маємо:

$$D = \sqrt{\frac{Q_g}{0,785w}} = \sqrt{\frac{0,00388}{0,785 \cdot 2}} = 0,0497 \text{ м} \approx 50 \text{ мм},$$

де Q_g – об'ємна витрата генераторного газу, м³/с; w – умовна швидкість газу в циклоні, що забезпечує найвищий рівень очистки, м/с (для циклонів типу СДК-ЦН обирається в діапазоні 2–2,3 м/с).

Складемо статистичну математичну модель процесу фільтрації газу в циклоні типу СДК-ЦН.

Обираємо як параметр оптимізації Y ефективність очистки газу η , %.

Проведемо вибір незалежних вхідних (геометричних) параметрів процесу: X_1 – діаметр циклону D , мм; X_2 – висота циліндричної частини циклону H_1 , мм; X_3 – відношення висоти конічної частини циклону H_2 до діаметра циклону D ; X_4 – кут нахилу конічної частини циклон β , град.; X_5 – відношення діаметру вихідного патрубку d до діаметра циклону D ; X_6 – відношення висоти вихідного патрубку h до висоти циліндричної частини циклону H_1 ; X_7 – відношення висоти вхідного патрубку a до висоти циліндричної частини циклону H_1 ; X_8 – відношення ширини вхідного патрубку b до діаметра циклону D ; X_9 – кут нахилу вхідного патрубку до горизонту γ , град. Всі вказані фактори є сумісні між собою та незалежними й, на думку авторів, є суттєвими.

Проведення повного багатофакторного експерименту за наявності 9 факторів є занадто трудомістким та тривалим процесом, тому доцільно здійснити відсіюючі експерименти з метою визначення незначущості окремих факторів.

Опираючись на попередні розрахунки, літературні джерела та технічні характеристики існуючих серійних циклонів, у відповідності з рекомендаціями методу «випадкового балансу», виберемо нижні та верхні рівні варіювання для всіх вказаних вище факторів (табл. 1).

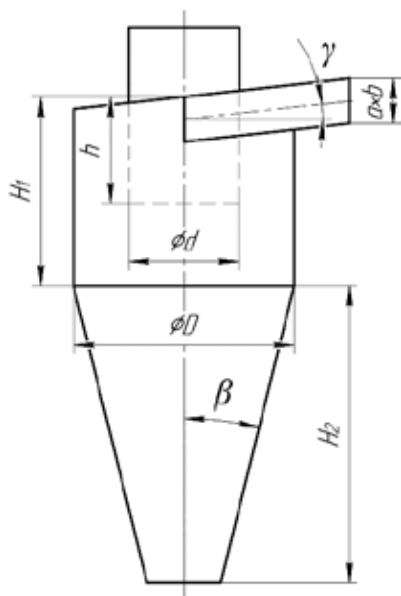


Рис. 1. Схема циклона та основні геометричні фактори

Створимо ряд розрахункових схем (моделей циклона) з відповідним варіюванням факторів (геометричних розмірів), що наведені в таблиці 1 (рис. 2, а).

Проведемо комплекс числових експериментів, використовуючи наведену вище математичну модель, згідно з планом відсіюючих дослідів та занесемо результати визначення ефективності очистки газу η , % в таблицю 2.

$$\eta = \frac{C_{\text{поч}}}{C_{\text{вих}}} 100\%$$

де $C_{\text{поч}}$ та $C_{\text{вих}}$ – вміст механічних домішок у генераторному газі на вході та на виході з циклону, г/м³.

Опираючись на результати відсіюючих числових експериментів, визначимо медіани та зсув медіан функції відгуку Y для кожного з дев'яти факторів при нижньому та верхньому рівні його варіювання (табл. 3).

Таблиця 1

Початкові значення факторів для відсіюючих дослідів

Фактор X_i	Нульовий рівень	Інтервал варіювання	Верхній рівень	Нижній рівень
X_1	100	50	150	50
X_2	100	50	150	50
X_3	2	1	3	1
X_4	8	1,5	9,5	6,5
X_5	0,4	0,1	0,5	0,3
X_6	0,5	0,3	0,8	0,2
X_7	0,55	0,25	0,8	0,3
X_8	0,2	0,1	0,3	0,1
X_9	17,5	6,5	24	11

Таблиця 2

Матриця планування відсіюючих дослідів

№ дослідів	Безрозмірні фактори									Функція Y
	Z_1	Z_2	Z_3	Z_4	Z_5	Z_6	Z_7	Z_8	Z_9	
1	-	-	-	-	+	-	+	-	-	42,25
2	+	-	-	-	-	+	-	-	+	45,31
3	-	+	-	-	-	+	-	-	+	41,00
4	+	+	-	-	+	-	+	+	+	45,38
5	-	-	+	-	+	-	-	+	-	46,08
6	+	-	+	-	-	+	+	-	-	48,47
7	-	+	+	-	-	+	+	+	-	45,64
8	+	+	+	-	+	-	-	+	+	47,10
9	-	-	-	+	+	-	-	+	-	37,25
10	+	-	-	+	-	+	+	+	+	45,99
11	-	+	-	+	-	+	+	-	-	41,89
12	+	+	-	+	+	-	-	-	+	43,35
13	-	-	+	+	+	-	+	-	-	41,62
14	+	-	+	+	-	+	-	+	+	47,71
15	-	+	+	+	-	+	-	-	-	43,61
16	+	+	+	+	+	-	+	+	+	46,31

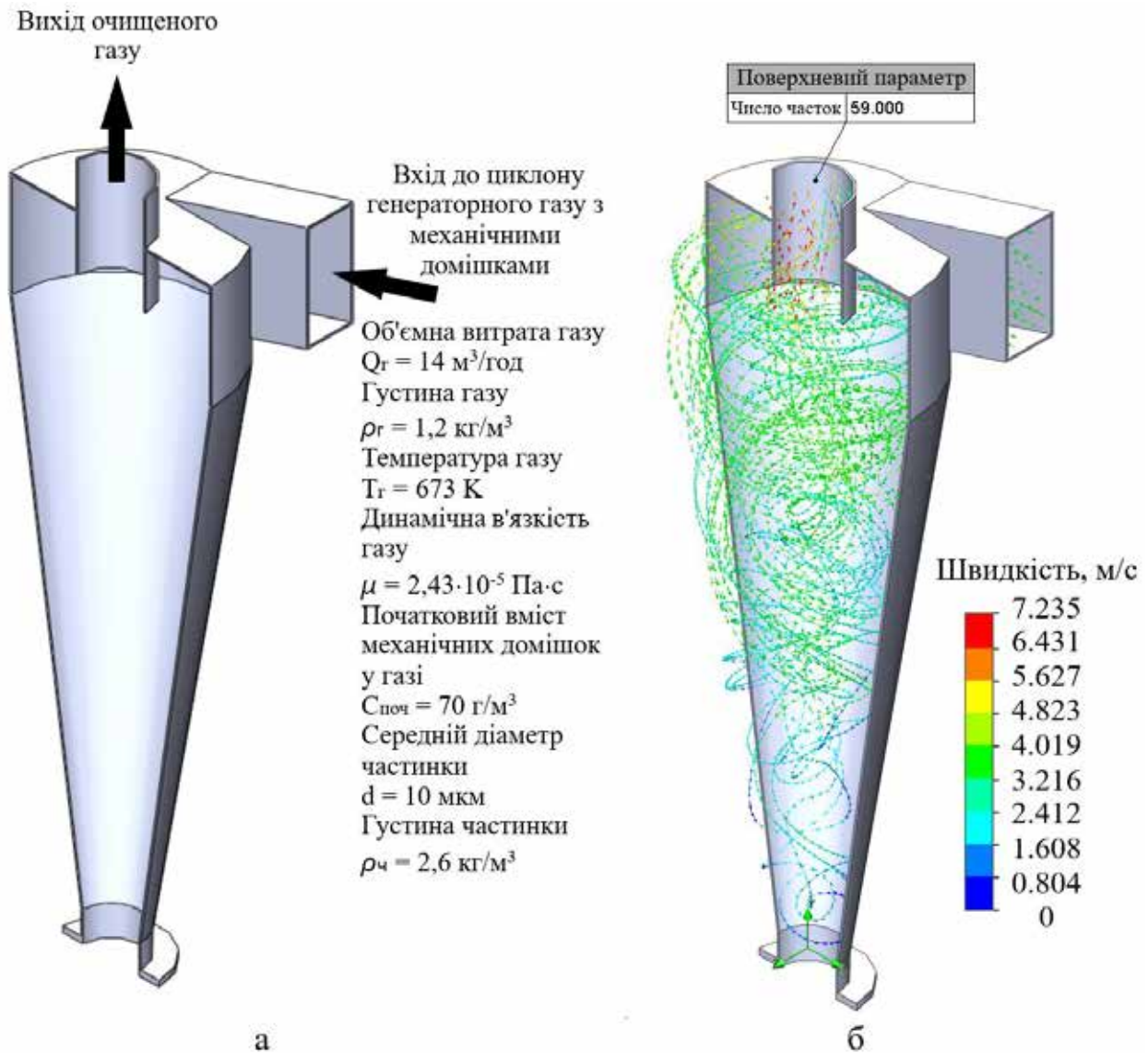


Рис. 2. Розрахункова схема (а) та приклад розподілу швидкостей руху твердих часток й ефективності очищення при одному з числових експериментів (б)

Відомо, що найбільший вплив на функцію відгуку надають ті фактори, які мають найбільшу величину зсуву [16, с. 112]. Отже можна зробити висновок, що найбільший вплив на функцію відгуку в нашому випадку надають фактори X_1 , X_3 , фактори X_9 , X_8 , X_4 теж мають досить чуттєвий вплив, а фактори X_2 , X_5 , X_6 , X_7 мають несуттєвий вплив.

Для проведення основного експерименту, на думку авторів, доцільно враховувати вплив факторів X_1 , X_3 , X_9 , а саме діаметру циклону D , відношення висоти конічної частини циклону H_2 до діаметра циклону D та кута нахилу вхідного патрубку до горизонту γ .

Необхідно планувати варіювання вказаних факторів, а інші фактори підтримувати на одному

з сталих рівнів. Залишаємо незмінними нижній рівень фактору X_4 , верхній рівень фактору X_8 , а фактори X_2 , X_5 , X_6 , X_7 зафіксуємо на нульовому рівні.

Аналізуючи конструктивно-технологічні особливості циклонів типу СДК-ЦН, а також результати попередніх числових експериментів, було зроблено висновок, про доцільність зменшення діапазону варіювання факторів для основного експерименту:

- фактор X_1 – підіймаємо нижній рівень до 100 мм не змінюючи верхній рівень;
- фактор X_3 – підіймаємо нижній рівень до 2 не змінюючи верхній рівень;
- фактор X_9 – опускаємо верхній рівень до 17 град. не змінюючи нижній рівень.

Таблиця 3

Функція відгуку Y для відповідного фактору та його рівнів

	Фактори								
	Z_1	Z_2	Z_3	Z_4	Z_5	Z_6	Z_7	Z_8	Z_9
Медіана Y для нижнього рівня	42,42	44,34	42,80	45,15	44,95	43,67	43,93	43,44	43,35
Медіана Y для верхнього рівня	46,20	44,29	45,82	43,47	43,67	44,95	44,69	45,18	45,27
Зсув медіани Y	3,79	0,05	3,02	1,69	1,28	1,28	0,77	1,75	1,92

Таблиця 4

Коефіцієнти рівняння регресії

Коефіцієнти рівняння регресії							
a_0	a_1	a_2	a_3	a_{11}	a_{22}	a_{33}	a_{123}
-26.208	0.867	-0.131	3.760	-0.003	0.368	-0.121	3.139

З метою знаходження екстремальної області існування функції відгуку η необхідне застосування планування другого порядку, тому для отримання математичної моделі другого порядку використаємо класичну матрицю та план ортогонального центрального композиційного планування (ОЦКП) для 3-х факторного експерименту [17, с. 61].

Основні числові експерименти проводимо аналогічно описаним вище відсіюючим експериментам.

За результатами спланованих дослідів (числових експериментів), методом найменших квадратів, з виконанням вимог регресійного аналізу, визначимо коефіцієнти рівняння (табл. 4):

$$Y = a_0 + \sum_{i=1}^n a_i X_i + \sum_{i=1}^n a_{ij} X_i X_j + \sum_{i=1}^n a_{ij} X_i^2 + \sum_{i=1}^n a_{ji} X_j^2,$$

де i – номер фактору, j – номер дослідів згідно плану ОЦКП, a – відповідні коефіцієнти рівняння.

Визначимо екстремум функції відгуку η , % та оптимальний розподіл факторів (геометричних параметрів циклона) в межах області факторного простору ($100 \leq D \leq 150$; $2 \leq H_2 / D \leq 3$; $11 \leq \gamma \leq 17$):

$$\eta(D, \frac{H_2}{D}, \gamma) \rightarrow \max;$$

$$D_{opt} = 126 \text{ мм}; \left(\frac{H_2}{D} \right)_{opt} = 3; \gamma_{opt} = 15,5 \text{ град};$$

$$\eta_{opt} = 60,486\%.$$

Висновок. Для невеликих приватних домогосподарств і мешканців сільської місцевості можна ефективно використовувати альтернативні технології отримання теплової та електричної енергії. В сучасних умовах технології газифікації біопалива швидко розвиваються, і їх використання стає все більш обґрунтованим й для газогенераторів малої потужності. Для отримання електроенергії на основі генераторного газу необхідне його

якісне очищення перед використанням в двигунах внутрішнього згоряння генераторів. На виході з газогенератора генераторний газ має високий вміст механічних домішок (до 100 г/м^3) таких, як пил, зола та сажа. Найбільш простим способом очистки генераторного газу від механічних домішок є застосування сухих методів очистки, в першу чергу циклонів.

При експлуатації газогенераторних установок малої потужності (до $40 \text{ м}^3/\text{год}$ газу) виникають значні проблеми з вибором конструкції та типорозмірів циклонів. Класичні методи розрахунку не дають адекватних результатів.

Зважаючи на відсутність достовірної методики для розрахунку геометричних розмірів циклонів малої потужності, створено математичну модель процесу фільтрації генераторного газу в інерційному циклоні та проведено комплекс числових експериментів спрямованих на визначення оптимальних геометричних співвідношень основних розмірів циклону. Як цільову функцію задачі оптимізації обрано якість очищення η , % генераторного газу від механічних домішок.

На основі ОЦКП встановлено зв'язок та отримано залежність впливу основних геометричних параметрів циклона на якість очистки генераторного газу від механічних домішок. Визначено оптимальний розподіл основних геометричних параметрів циклона малої продуктивності.

Проведені дослідження показали недостатню якість очистки ($\eta_{opt} = 60,486\%$) генераторного газу в циклонах при сухому методі очистки. Для використання генераторного газу в двигунах внутрішнього згоряння необхідне додаткове очищення, тобто використання двостадійної очистки. В наступних роботах автори планують проведення досліджень спрямованих на розробку оптимальної конструкції фільтрів тонкої очистки для газогенераторів малої потужності.

Список літератури:

1. Thomas Laffitte and Ihor Moshenets, «Synchronized: The Impact of the War on Ukraine's Energy Landscape», December 5, 2023, URL: <https://issuu.com>.
2. «Ukrainian energy sector evaluation and damage assessment – VI», January 24, 2023, URL: <https://www.energycharter.org>. (дата звернення 17.03.2024).
3. Ціни на бензин, дизпаливо, газ на АЗС України, URL: <https://index.minfin.com.ua/ua/markets/fuel/2024-01> (дата звернення 17.03.2024).
4. Negoda O., Sobchenko V. and Orailo O. Gasification in eddies devices as promising direction development gas generators technologies, Energy-saving technologies and equipment, 2013, pp. 17–20.
5. Дорундяк Л.М. Результати дослідження ефективності процесу пиловловлення у циклоні для системи перекачування деревних відходів. Науковий вісник НЛТУ України 22.14 (2012): с. 152–157.
6. Ляшеник А.В. та ін. Вплив висоти циліндричної частини та глибини занурення вихлопної труби на характеристики циклона. Науковий вісник НЛТУ України 21.3 (2011), с. 101–106.
7. Очеретько А.В., Черембячко І.М. Збільшення ефективності роботи центробіжних пиловловників на гірничому виробництві / А. В. Очеретько, Молодь: наука та інновації: матеріали Всеукраїнської науково-технічної конференції студентів, аспірантів та молодих вчених, Дніпро, 11–12 листопада 2021 року / Національний технічний університет «Дніпровська політехніка» – Дніпро : НТУ «ДП», 2021 – с. 91–92.
8. Беднарська І.С., Риндюк Д.В. Визначення напружено-деформованого стану стопорно-регулюючого клапана АЕС з урахуванням газодинаміки робочого тіла. Вчені записки Таврійського національного університету імені В.І. Вернадського Серія: Технічні науки, Том 33(72), № 5, 2022. С. 193–198. DOI <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2022.5/28>
9. Tsyvenkova N., Golubenko A., Mulyar A., Los L., Romanyshyn A. The investigation of the technical specifications of gas generator purification system MOTROL. Commission of Motorization and Energetics in Agriculture – 2016. Vol.18. No.1. 71–80.
10. David Leith, Dilip Mehta, Cyclone performance and design, Atmospheric Environment, Volume 7, Issue 5, 1973, Pages 527–549, ISSN 0004-6981.
11. Muhammad I. Taiwo, Mohammed A. Namadi and James B. Mokwa, Design and analysis of cyclone dust separator / American Journal of Engineering Research (AJER), Volume-5, Issue-4, pp-130–134, e-ISSN: 2320-0847, p-ISSN: 2320-0936.
12. Hirsch Ch. Numerical Computation of Internal and External Flows: The Fundamentals of Computational Fluid Dynamics. 2nd Edition – June 4, 2007, p. 700. ISBN: 9780750665940.
13. Del Castello L., and Clercx H. J. H. Lagrangian acceleration of passive tracers in statistically steady rotating turbulence, Physical Review Letters, 2011. pp. 107–502.
14. Henderson, C. B. Drag coefficients of spheres in continuum and rarefied flows. AIAA Journal, 14(6), 1976. pp. 707–708.
15. Carlson, D. J., & Hognlund, R. F. Particle drag and heat transfer in rocket nozzles. AIAA Journal, 2(11), 1964. pp. 1980–1984.
16. Методи оптимізації та математична статистика / уклад. Т.Г. Мисюра, Т.М. Погорілий, В.Л. Зав'ялов – К.: НУХТ, 2017. – 169 с.
17. Методи оптимізації та математична статистика: курс лекцій для студентів освітнього ступеня «Магістр» / Бодров В.С., Зав'ялов В.Л., Мисюра Т.Г. та інші. – К.: НУХТ, 2016. – 103 с.

Rindyuk D.V., Stepanchenko A.A. DETERMINATION OF OPTIMAL DESIGN PARAMETERS OF AN AIR CYCLONE FOR A LOW-POWER GAS GENERATOR

In the current difficult economic and political situation in Ukraine, small private households and farmers in rural areas are looking for alternative technologies for generating heat and electricity. The technology of biofuel gasification may be a reasonable and inexpensive option. Its use is justified from the point of view of using it in low-power power supply systems. To obtain electricity on the basis of generator gas, it is necessary to clean it properly before using it in internal combustion engines of generators. The simplest way to clean generator gas from mechanical impurities is to use dry cleaning methods, primarily cyclones. However, when designing low-capacity gas generating units (up to 40 m³/h of gas), significant problems arise with the choice of design and size of cyclones. The efficiency of generator gas purification by cyclones, the design and technological parameters of which were chosen using classical calculation methods, is low. Given the lack of a reliable methodology for calculating the geometric dimensions of low-power cyclones, a mathematical model of the process of filtering generator gas in an inertial cyclone was created. A list of the main geometric parameters of the cyclone was selected. Using the method of random balance, screening experiments were

conducted to determine the magnitude of the influence of specific parameters on the efficiency of cleaning the generator gas from mechanical impurities. The geometric parameters that have the main influence are highlighted. A set of basic numerical experiments aimed at determining the optimal geometric ratios of the main dimensions of the cyclone was carried out. As the objective function of the optimization problem, the quality of purification η , % of the generator gas from mechanical impurities, was chosen. The dependence of the influence of the main geometric parameters of the cyclone on the quality of purification of generator gas from mechanical impurities was obtained. The optimal distribution of the main geometric parameters for a low-capacity cyclone is determined.

Key words: generator gas, mechanical impurities, cyclone, mathematical modeling, optimization.

Черноусенко О.Ю.

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

Бутовський Л.С.

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

Рудик М.А.

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

Доросевич В.С.

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

СТЕНДОВІ ВИПРОБУВАННЯ НАТУРНОЇ ДВОЗОННОЇ ВИСОКОТЕМПЕРАТУРНОЇ КАМЕРИ ЗГОРЯННЯ

Розглянуті результати стендових випробувань натурної високотемпературної двозонної камери згоряння потужністю 2,5 МВт для газогенератора з температурою повітря на вході в камеру 450 °С і розрахунковою температурою вихідних газів 1350 °С. Внутрішній діаметр керамічної жарової труби камери складає 260 мм. Кожна із двох вогневих зон камери має ідентичну конструкцію і являє собою кільцевий канал з середнім діаметром 200 мм і висотою 60 мм, в якому розміщений фронтний пристрій у вигляді кільцевого колектора-стабілізатора шириною 25,0 мм. Стабілізатори з обох боків обтікаються повітряним потоком, який проходить по каналах шириною 17,5 мм. Для інтенсифікації сумішеутворення і горіння палива з обох сторін стабілізатора з зовнішньої і внутрішньої сторін стабілізатора встановлені реєстрові лопатки, які повертають струмені повітря в різні боки під кутами 60 ° і 45 ° відносно осі камери. В камері згоряння виконано окреме підведення до обох стабілізаторів газового палива, яке через систему отворів у вихідному торці подається в зону рециркуляції за стабілізаторами. Газо-повітряна суміш першою за ходом повітря зони горіння подається в вогневий простір камери через центральне сопло діаметром 100 мм. У другій зоні відбувається процес дифузійного горіння палива за стабілізатором. Високотемпературні продукти згоряння другої зони використовуються для підпалювання газо-повітряної суміші, яка виходить через центральне сопло. Завдяки однакової конструкції обох зон на часткових режимах можливе також одночасне дифузійне горіння палива в обох зонах. Результати випробувань показали надійне запалювання і роботу камери при зміні швидкості повітряного потоку і коефіцієнту надлишку повітря. В камері згоряння відсутній змішувач, який зазвичай служить для зменшення температури газів і формування поля температур. Для забезпечення можливості роботи при високій температурі газів без подачі повітря на охолодження стінки жарова труба виконана у вигляді кільця з алюмо-боридо-нітрідної конструктивної кераміки, яка витримувала температуру газів до 1350 °С і вище. Прийнята схема організації процесу горіння дозволила розширити діапазон сталої роботи камери, а також зменшити викиди оксидів азоту. Мінімальна концентрація оксидів азоту на розрахунковій температурі газів складає 37,0 мг/м³, що відповідає кращим світовим зразкам.

Ключові слова: двозонна камера згоряння, кільцевий стабілізатор, різнойменна закрутка, газо-повітряна суміш, дифузійне горіння, сталість горіння, керамічна жарова труба, оксиди азоту.

Постановка проблеми. Рівень розвитку енергетичної галузі країни визначається, в першу чергу, ефективністю обладнання, що використовується, і рівнем викидів токсичних речовин, зокрема, оксидів азоту.

Використання електричної енергії в межах промислового регіону характеризується значною нерівномірністю протягом суток, місяців і року [1, с. 44]. Таким же чином повинно бути виробництво електроенергії. Основним виробником

електричної енергії в Україні є теплові та атомні електростанції. Енергосистема України характеризується гострим дефіцитом маневрових потужностей. Паротурбінні установки великої і середньої потужності на ТЕС та АЕС призначені для роботи в базовому режимі при постійному навантаженні. Зміна режиму роботи, пуски, останови призводять до зниження ефективності агрегатів, а, значить, до значної перевитрати палива. Середній електричний ККД ТЕС України складає 29–31 %, тоді як за рубежом кращі енергоблоки при роботі в базовому режимі досягли рівня 45 %.

Крім цього, в обладнанні, в першу чергу високотемпературному, особливо при роботі на змінних режимах виникають значні термічні напруги. Враховуючи значну зношеність вітчизняних паротурбінних установок, робота на змінних режимах становить небезпеку виникнення аварійних ситуацій.

В світовій практиці для швидкої зміни потужності і зняття пікового навантаження використовують різні види демпфуючих установок, в першу чергу, газових турбін, які працюють окремо, або в складі парогазових установок [2, с. 54]. Перевагою таких установок є можливість швидкого пуску і останову, а також роботи на змінних режимах.

В свою чергу, показники газотурбінних установок повинні відповідати сучасним вимогам щодо ефективності та надійності. Відомо, що для підвищення ефективності газотурбінних і парогазових установок необхідне збільшення температури газів перед турбіною. Так, розрахунки показують [3, с. 24], що для паротурбінного блоку з електричною потужністю 300 МВт і більше в комплексі з газотурбінною надбудовою при початковій температурі газу 1300 °С коефіцієнт корисної дії нетто енергокомплексу доходить до 52–53 %. При удосконаленні енергокомплексів їх ККД-нетто в перспективі при початковій температурі газів до 1500 °С може бути доведений до 60 %.

Останнім часом вважається, що для промислового і комунального господарства доцільним було б використання когенераційних установок невеликої потужності (0,2–2,0 МВт), необхідність в яких складає біля 3000 установок, а також реконструкція існуючих котельних в міні-ТЕЦ з електричною потужністю до 50 МВт [2, с. 57].

Успішна експлуатація вогнетехнічного об'єкта в значній мірі визначається палинковим пристроєм. Від його характеристик стосовно, ефективності, надійності, довговічності, екологічності тощо в значній мірі залежать показники всього

агрегату в цілому. В переважній більшості історично використовуються палинкові пристрої реєстрового типу з закруткою повітряного, а іноді і газового потоків. З точки зору сучасних підходів значна частина з них не відповідає вимогам, що висуваються до палинкових пристроїв.

Значна частина з них мають недостатньо високі техніко-економічні характеристики, що зумовлено застарілими методами організації в них робочого процесу. Такі палинки характеризуються, зокрема, вузьким діапазоном стійкої роботи при зміні швидкості повітряного потоку і коефіцієнта надлишку повітря, значними викидами оксидів азоту та вуглецю, неефективною роботою на часткових завантаженнях, що призводить до перевитрати палива, тощо.

Таким чином, актуальність проблеми визначається необхідністю економії дефіцитного газоподібного палива і законодавчими вимогами охорони навколишнього середовища від забруднення токсичними продуктами згорання шляхом впровадження в газових турбінах, а також інших об'єктах енергетичного, промислового і комунального господарства України високоефективних технологій спалювання палива і відповідних палинків.

Перспективним напрямком у вирішенні зазначеної проблеми може бути використання палинків з мікрофакельним (мікродифузійним) спалюванням газу в системі порівняно невеликих погано обтічних тіл – стабілізаторів, які обтікаються повітряним потоком. Організація процесу спалювання палива в системі мікрооб'ємів, які утворюються за стабілізаторами, і пов'язане з цим збільшення поверхні займання і горіння, дозволяє підвищити інтенсивність горіння і теплову напругу топкового обсягу і скоротити довжину факелу. Використання відповідних схем сумішотворення газу і повітря дозволяє досягти оптимального співвідношення компонентів горіння в залежності від вимог, що пред'являються до палинкового пристрою.

Мікрофакельні палинки стабілізаторного типу показали високу ефективність роботи при зміні режимних параметрів, а зменшення часу перебування продуктів реакції в зоні високих температур призводить також до зниження рівня викидів токсичних оксидів азоту [4, с. 75]. При мікрофакельному спалюванні палива в системі стабілізаторів забезпечується можливість розробки палинків різної потужності за рахунок зміни кількості окремих модульних елементів. Завдяки принципу прямоточності такі палинки мають знижений аеродинамічний опір [5, с. 113].

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Пальникові пристрої стабілізаторного типу, які, як правило, становлять собою систему погано обтічних тіл-стабілізаторів, що обтікаються повітряним потоком, мають низку суттєвих властивостей. З одного боку, паливо в них подається дискретними струменями в високо турбулентну зону рециркуляції за стабілізатором і реалізується дифузійний принцип подачі і горіння газу – мікродифузійне горіння, тобто горіння відбувається в широкому діапазоні режимів щодо коефіцієнту надлишку і швидкості повітря. З другого боку, завдяки інтенсивному сумішоутворенню робочий процес має характеристики, що притаманні попередньо перемішаним сумішам палива і повітря, тобто горіння відбувається з високою інтенсивністю. Крім того, в зону рециркуляції безпосередньо попадає тільки частка повітря, що обтікає стабілізатор, і це також розширює діапазон сталого горіння в бік збільшення коефіцієнту надлишку повітря в самому пальнику.

Встановлена загальний вигляд щодо впливу конструктивних факторів – ширини стабілізатора, системи газороздачі, коефіцієнту затінення стабілізаторної решітки, взаємного розташування стабілізаторів, опір пальника, а також режимів роботи – швидкості і температури повітряного потоку, на основні характеристики робочого процесу – інтенсивність вигорання палива, повноту згорання, температурне поле викидних газів, вміст токсичних продуктів типу оксидів азоту і діоксиду вуглецю тощо. В той же час, вплив того чи іншого конкретного параметра часто залежить від умов роботи – характеру поля швидкості повітряного потоку, інтенсивності турбулентності тощо [6, с. 184; 7, с. 162].

На шляху використання високоефективних пальникових пристроїв останнім часом широке впровадження отримали стабілізаторні пальники із струменево-нішевою системою сумішоутворення і стабілізації полум'я, в яких в корпусі плоского стабілізатора з обох боків виконуються нішеві поглиблення, а паливо подається в обтічний повітряний потік через систему отворів, які розташовані перед нішевим поглибленням [8, с. 14; 9, с. 90; 10, с. 57]. В пальникових пристроях струменево-нішевого типу реалізується комбінована схема сумішоутворення і горіння за рахунок взаємодії зон рециркуляції в нішевих поглибленнях і торцевої стінки стабілізатора. Таким чином, в основу струменево-нішевої технології покладено принцип раціонального розподілу палива в потоці окисника, регулювання структури течії палива, окисника і продуктів згорання,

саморегулювання складу суміші в зоні факела, самоохолодження пальника, термічна підготовка палива. З використанням струменево-нішевої технології в пальниках проведено модернізацію кількох сотен вогнетехнічних об'єктів комунального господарства, хімічної і будівельної промисловості в Україні і за рубежом.

Існує ціла низка об'єктів, в першу чергу в агропромисловому комплексі, де в конструкцію енергетичного обладнання легко інтегруються мікрофакельні пальникові пристрої з циліндричними стабілізаторами полум'я [11, с. 98].

Їхня більш висока ефективність у порівнянні з традиційними пальниковими пристроями, в яких використовуються плоскі стабілізатори, обумовлена, головним чином, відсутністю різного роду втрат, які пов'язані з кінцевими ефектами.

Україна має другу за потужністю газотранспортну систему в Європі, тому є актуальним підвищення надійності, екологічної безпеки та ефективності експлуатації газоперекачуючих агрегатів на компресорних станціях, в складі яких налічується більше 80 % газотурбінних приводів. Україна є також однією з нечисленних країн, яка виробляє газотурбінні двигуни, тому в сучасних умовах вирішення питання конкурентоспроможності випуску високоефективних газотурбінних двигунів має першочергову перспективу.

Сучасні закордонні виробники ГТУ, наприклад, General Electric, Siemens, Solar, Rolls-Royce, Mitsubishi та ін. постійно розробляють і впроваджують нові типи камер згорання, показники робочого процесу яких задовольняють вимогам, які стають все більше жорсткими.

В Київському політехнічному інституті виконуються дослідження і розробляються камери згорання, які за своєю технологією спалювання газу є одним з різновидів пальникових пристроїв стабілізаторного типу, а саме трубчаста технологія спалювання газу [12, с. 60]. В результаті проведення відповідних науково-дослідних робіт вдалося розробити пальниковий пристрій, який має властивості універсальності використання, тому що дозволяє з високою ефективністю виконувати спалювання різних видів за хімічним складом і теплотвірною спроможністю газових палив природного і штучного походження в топках котлів, теплогенераторів, камер згорання газотурбінних двигунів, газопарових та парогазових установок. Були розроблені і випробувані нові пальникові системи в камерах згорання ГТУ в складі газоперекачуючих агрегатів типу ГТК-10-4 і ГТ-750-6 (Брненський механічний завод, Чехія).

Аналіз показує, що роботи, які пов'язані з розробкою високоефективних паливкових пристроїв стабілізаторного типу з мікофакельним спалюванням газу, на даний момент не охоплюють всі складові процесу і вимагають проведення подальших досліджень, особливо натурних зразків.

Постановка завдання. Метою дослідження було визначення характеристик мікродифузійної високотемпературної двозонної камери згоряння з кільцевими фронтними пристроями стабілізаторного типу, в яких стабілізатори обтікаються різнойменно закрученими повітряними потоками, а газове паливо подається в зону рециркуляції за стабілізаторами [13, с. 157]. В результаті випробувань визначалась роботоспроможність неохолоджуваної жарової труби, яка виконана з алюмоборидо-нітридної конструктивної кераміки.

Виклад основного матеріалу. Схема камери згоряння показана на рис. 1.

Камера згоряння камера призначена для роботи при температурі повітря $t_{п} = 450$ °С, продуктів згоряння $t_{п.з} = 1350$ °С, розрахунковому коефіцієнті надлишку повітря $\alpha = 2,36$.

Камера складається з двох, фактично, однакових паралельно працюючих фронтних пристроїв, які зміщені один відносно другого за потоком повітря і умовно утворюють першу (1-шу) і другу (2-гу) зони. З обох боків реєстри.

В розробленій камері для інтенсифікації процесів сумішоутворення і горіння палива [13, с. 158]. з обох боків колекторів-стабілізаторів (1) шириною $B_{ст} = 25$ мм та з середнім діаметром $D_{ст} = 200$ мм встановлені різнойменно повернуті лопатки – реєстри (2) шириною $B_{рег} = 17,5$ мм. В результаті розрахунків встановлено, що з точки зору рівномірності кількості руху повітряних потоків з обох боків стабілізаторів оптимальним

є варіант, при якому зовнішні реєстри повертають повітряний потік під кутом $+60^{\circ}$ проти годинникової стрілки по відношенню до повздовжньої осі камери згоряння, якщо дивитися за ходом повітря, а внутрішні реєстри – під кутом -45° за годинниковою стрілкою. В обох стабілізаторах газ подається в зону рециркуляції за ними через систему з 60 отворів (3) діаметром $d_r = 2,0$ мм, які виконано у вихідній торцевій стінці стабілізатора. Коефіцієнт затінення фронтних пристроїв першої і другої зон без урахування повороту потоку $K_f^{\phi} = 0,49$, а з урахуванням кута повороту потоку і товщини лопаток $K_f^{\phi} = 0,735$.

Результати вимірів показали, що витрата повітря між обома зонами практично однакова і складає половину від загальної витрати повітря в камері.

Робочий процес в камері згоряння організовано за комбінованим принципом. В першій зоні газ, що подається через отвори в вихідній торцевій стінці стабілізатора, утворює газо-повітряну суміш, яка подається на горіння через центральне сопло (4) діаметром $D_c = 100$ мм. Завдяки прийнятій конструкції камери на часткових режимах в першій зоні також можлива робота з горінням факелу за стабілізатором за дифузійним принципом. В цьому випадку через центральне сопло в камеру згоряння подаються продукти горіння.

В другій зоні реалізується тільки дифузійний принцип спалювання палива за стабілізатором. Факел другої зони служить для підпалювання газо-повітряної суміші, яка виходить з центрального сопла. На часткових режимах можлива робота однієї другої зони.

Прийнята система комбінованого горіння дозволила реалізувати позитивні якості кожної з схем газороздачі – робота другої зони за дифу-

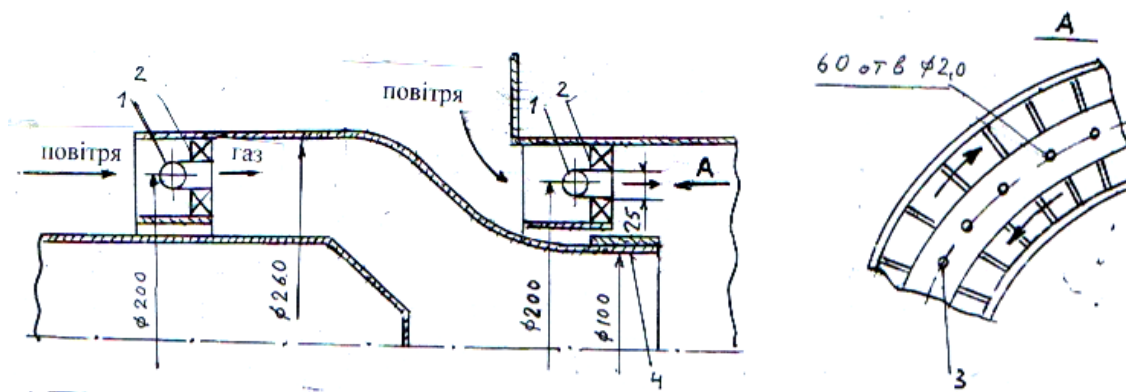


Рис. 1. Схема двозонної камери згоряння

1 – колектор-стабілізатор; 2 – реєстр; 3 – газоподаючі отвори; 4 – центральне сопло

зійним принципом забезпечує стає горіння при зміні коефіцієнту надлишку повітря і швидкості потоку, а спалювання попередньо підготовленої газо-повітряної суміші зменшує викиди токсичних оксидів азоту.

Відмова від подачі повітря для охолодження стінок жарової труби підвищує їхню температуру. Тому в розробленій камері згорання жарова труба виконана із високотемпературної конструктивної кераміки.

Вона складається з 13 кілець з алюмо-боридо-нітридної кераміки з внутрішнім діаметром 260 мм, довжиною кілець по потоку – 30 мм, товщиною – 15 мм. Загальна довжина керамічної жарової труби дорівнює 390 мм. Для виміру температури елементів камери згорання передбачена установка термопар на фронтівому пристрої і на зовнішній поверхні жарової труби.

Для розрахунків коефіцієнтів надлишку повітря по зонах і в цілому в камері згорання використовувались такі співвідношення:

$$\alpha^I = 0,5G_n / L_0G_r^I; \alpha^{II} = 0,5G_n / L_0G_r^{II};$$

$$\alpha^\Sigma = G_n / L_0G_r^\Sigma \quad (1)$$

де G_0 – загальна витрата повітря; G_r^I ; G_r^{II} ; G_r^Σ – відповідно витрати газу в першу, другу зони і загальна витрата; α^I ; α^{II} ; α^Σ – відповідні коефіцієнти надлишку повітря; L_0 – ваговий стехіометричний коефіцієнт.

Для визначення діапазону можливої роботи камери згорання були визначені межі робото-спроможності камери згорання, тобто характе-

ристики «бідного» зриву і запалювання факелу в кожній зоні.

На рис. 2 приведено характеристики запалювання $\alpha_{зап}^{II}$ і бідного зриву α_{max}^{II} факелу в другій зоні.

Випробування показали, що сталість факелу на режимі бідного зриву підвищується з підігрівом повітря. Після аналізу отриманих даних і обробки результатів досліджень щодо впливу режимних і конструктивних факторів на характеристики бідного зриву факелу у другій зоні при різномірній закрутці повітряного потоку, що оббігає стабілізатор, виявилась можливість в діапазоні температур повітря $t_n = (150 \div 450) \text{ }^\circ\text{C}$ узагальнити отримані дані у вигляді

$$\alpha_{max}^{II} = K_{max}^{II} \times \frac{1}{w_k^{II}} \times \frac{B_{ст}^{0.5} \times d_r (F_{ст}/F_r)^{0.2}}{K_f^2 \times (1 + K_f^2)(1 + tg\varphi)^{1.5}} \times \left(\frac{T_n}{273}\right)^m \quad (1)$$

де K_{max}^{II} – дослідний коефіцієнт; $B_{ст}$ – ширина стабілізатора, мм; d_r – діаметр газового отвору, мм; $F_{ст}$, F_r – площа вихідного торця стабілізатора і сумарна площа газоподаючих отворів, мм²; W_k – швидкість повітря в кільцевому каналі перед фронтівим пристроєм, м/с; T_n – температура повітря, К; K_f^0 – коефіцієнт затінення фронтівого пристрою, який розраховується як $K_f^0 = B_{ст}/B_k$, де B_k – ширина кільцевого каналу перед фронтівим пристроєм; φ – кут різномірного повороту повітряного потоку, град., розрахунки виконувались для $\varphi = 60^\circ$.

На рис. 3 отримані експериментальні дані для дослідженої камери згорання представлені

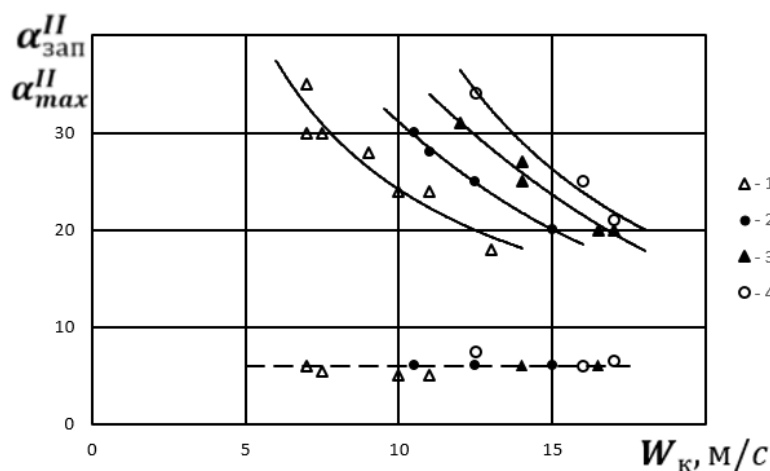


Рис. 2. Характеристики запалювання $\alpha_{зап}^{II}$ і бідного зриву α_{max}^{II} факелу в другій зоні пальника в залежності від швидкості повітряного потоку в перерізі фронтівого пристрою W_k при різних температурах повітря t_n

Позначення: 1 – $t_n = 150 \text{ }^\circ\text{C}$; 2 – $t_n = 250 \text{ }^\circ\text{C}$; 3 – $t_n = 350 \text{ }^\circ\text{C}$; 4 – $t_n = 450 \text{ }^\circ\text{C}$; суцільні лінії – бідний зрив; пунктирна лінія – запалювання факелу

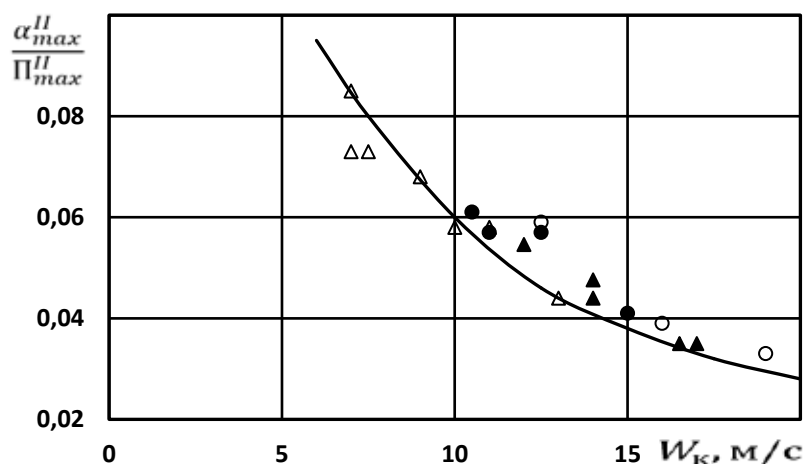


Рис. 3. Залежність відношення $\alpha_{max}^{II} / \Pi_{max}^{II}$ для стабілізаторного пальника другої зони з подачею газу в зону рециркуляції від швидкості повітряного потоку перед стабілізатором
Позначення режимів див. рис. 2

у вигляді залежності відношення $\alpha_{max}^{II} / \Pi_{max}^{II} = f(W_k)$, тобто від швидкості повітряного потоку перед стабілізатором:

Параметр бідного зриву Π_{max}^{II} має вигляд

$$\Pi_{max}^{II} = K_{max}^{II} \frac{B_{cm}^{0.5} \times d_z (F_{cm} / F_z)^{0.2}}{K_f \times (1 + K_f) (1 + tg\phi)^{1.5}} \times \left(\frac{Tn}{273} \right)^m \quad (2)$$

При обробці дослідних даних отримані такі значення параметрів:

$$K_{max}^{II} = 18,24; m = 1,8; n = -1,0.$$

Запалювання факелу в дослідженому діапазоні швидкостей і температури повітря відбувається при коефіцієнтах надлишку повітря $\alpha_{зан}^{II} \approx 4 \div 6$ (рис. 2), що більше номінальних режимів роботи камери згоряння, $\alpha_{розр}^{II} = 2,36$. При випробуваннях не встановлено в плив температури повітря на характеристики запалювання. Такий характер запалювання, можливо, пов'язаний з тим, що факельний запальник знаходиться на порівняно великій відстані від стабілізатора за зоною рециркуляції. Тому характеристики зони зворотних струмів менше, ніж зазвичай, впливають на процес запалення, який відбувається, коли концентрація палива в області дії факельного запальника збільшується і суміш входить в межі горіння.

Таким чином, в зв'язку з реалізацією дифузійного принципу спалювання газу при подачі палива в зону рециркуляції за стабілізатором х забезпечувалась надійна робота при зміні коефіцієнтів надлишку повітря і швидкості повітряного потоку.

Однією з вимог, яким повинна задовольняти камера згоряння, є забезпечення високої повноти згоряння палива.

На рис. 4 наведені отримані дані по повноті згоряння при роботі другої зони при температурі повітря на вході $t_{п} = 250 \text{ }^{\circ}\text{C}$, $350 \text{ }^{\circ}\text{C}$ та $450 \text{ }^{\circ}\text{C}$.

Як видно, при розрахункових значення температур повітря $t_{п} > 350 \text{ }^{\circ}\text{C}$ і коефіцієнти надлишку повітря $\alpha^{II} \approx 2,36$ забезпечується практично повне вигорання палива.

Такі ж вимоги забезпечення високої повноти згоряння висуваються до камери згоряння при роботі на комбінованому режимі у разі подачі газоповітряної суміші з першої зони через центральне сопло (рис. 5).

Як показали дослідження, під час роботи другої зони і підключення подачі газоповітряної суміші через центральне сопло для забезпечення високої повноти згоряння температура продуктів горіння повинна бути $t_{п,г} > 800 \text{ }^{\circ}\text{C}$. Повнота згоряння стає, практично, повною при температурі продуктів горіння в камері $t_{п,г} > 1100 \text{ }^{\circ}\text{C}$. Таким чином, на розрахунковій температурі продуктів згоряння $t_{п,г} = 1350 \text{ }^{\circ}\text{C}$ ($t_{п} > 350 \text{ }^{\circ}\text{C}$) забезпечується повне вигорання палива і при роботі в комбінованому режимі.

Важливою характеристикою камери згоряння являється токсичність продуктів згоряння, зокрема, вихід оксидів азоту NOx. На першому етапі виконувалось визначення концентрації оксидів азоту при роботі камери згоряння по дифузійному режиму при горінні факелу в одній другій або в обох зонах за дифузійним принципом. Ці дані приведені на рис. 6 у вигляді суцільної кривої (1).

Вміст оксидів азоту визначався при роботі другої зони з постійним коефіцієнтом надлишку повітря $\alpha^{II} = \text{const}$ і подачею через центральне сопло

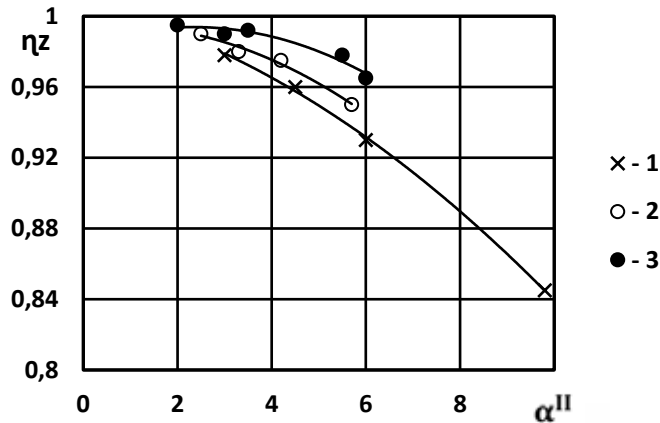


Рис. 4. Залежність повноти згоряння η_z від α^{II} на виході з мірної ділянки камери ($X = 450$ мм) при різній температурі повітря і подачі газу тільки в II зону (дифузійну)
 1 – $t_n = 250$ °C; 2 – 350 °C; 3 – 450 °C

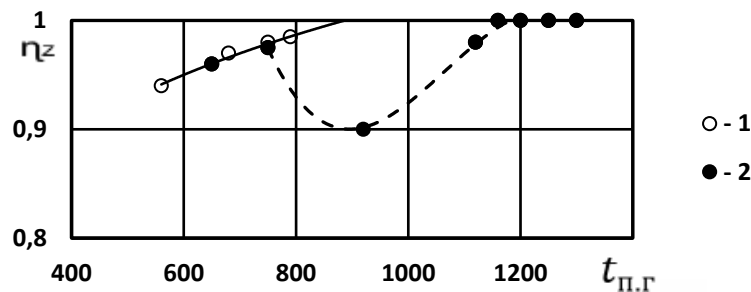


Рис. 5. Характеристики камери згоряння при комбінованій роботі з подачею газоповітряної суміші через центральне сопло ($X = 450$ мм, $t_n = 350$ °C)
 1 – дифузійне горіння в другій зоні; 2 – комбінована робота обох зон

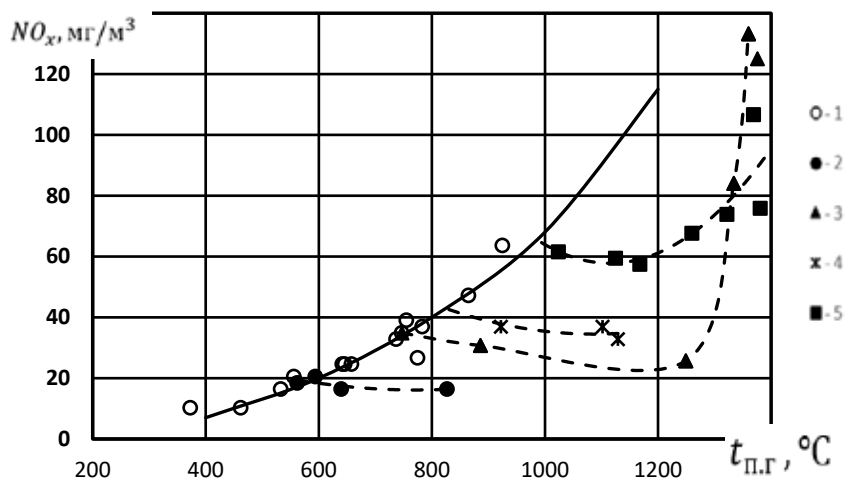


Рис. 6. Значення викидів оксидів азоту при різних режимах роботи
 1 – $G_z^I = 0$; $\alpha^{II} = var$ 2 – $\alpha^{II} = 3,65$, $\alpha^I = var$, $t_n = 250$ °C; 3 – $\alpha^{II} = 4,0$, $\alpha^I = var$, $t_n = 350$ °C; 4 – $\alpha^{II} = 2,36$, $\alpha^I = var$, $t_n = 450$ °C; 5 – $\alpha^{II} = 1,95$, $\alpha^I = var$, $t_n = 450$ °C

газо-повітряної суміші різного складу $\alpha^I = var$, яка утворювалась в першій зоні (рис. 7, пунктирні лінії). Суміш першої зони запалювалась на вихід-

ній кромці сопла першої зони. Як показали результати вимірів, при подачі газоповітряної суміші з першої зони при підвищенні температури газів

концентрація оксидів азоту на якомусь етапі не збільшується, а навіть трохи зменшується. Тільки при подальшому підвищенні температури газів відбувається збільшення концентрації NOx.

Для даної конструкції залежність концентрації оксидів азоту від температури на виході з камери згоряння при роботі одної або обох зон за дифузійним принципом можна розраховувати за такою формулою

$$\text{NOx} = 1,86 \cdot 10^{-6} \cdot t_{п.г}^{2,53} \quad (3)$$

Були виконані випробування з метою організації режиму горіння з мінімальними викидами оксидів азоту. Встановлено, що такий режим можливо реалізувати при підігріві повітря $t_n = 450 \text{ }^\circ\text{C}$ і розрахунковій температурі газів $t_{п.г} = 1350 \text{ }^\circ\text{C}$ при коефіцієнтах надлишку повітря $\alpha^I = 1,84$, $\alpha^{II} = 2,76$, $\alpha^\Sigma = 2,21$, коли вміст NOx на виході з камери ($X = 450 \text{ мм}$) дорівнює $37,0 \text{ мг/м}^3$, що відповідає кращим світовим зразкам. Оптимальне співвідношення витрат газів між першою та другою зонами в цьому випадку $G_r^I / G_r^{II} = 1,5$ або $G_r^I / G_r^\Sigma = 0,6$.

Встановлено, що в камері згоряння є можливість формування поля температур газів в перерізі камери шляхом зміни в певних межах витрати палива між зонами.

Проведене вимірювання температури вихідної торцевої поверхні стабілізатора другої зони (рис. 7) показало, що максимальна температура стінки спостерігається на часткових режимах, близьких до режимів бідного зриву ($\alpha^{II} \approx 10$), коли факел знаходиться в зоні рециркуляції в безпосередній близькості від стабілізатора, і перевищує температуру вхідного повітря ($t_{ст.} - t_n$) на $400 \text{ }^\circ\text{C}$.

На режимах роботи, близьких до розрахункового, різниця температури стабілізатора дорівнює близько $200 \text{ }^\circ\text{C}$, що свідчить про ефективність прийнятої системи охолодження стабілізатора.

Работоспроможність високотемпературних камер згоряння в значній мірі визначається характеристиками матеріалу жарової труби. В конструкціях камер згоряння з металевою жаровою трубою повітря, яке йде на охолодження стінок жарової труби, практично не приймає участі у процесі горіння палива і вважається шкідливою втратою, що зменшує ефективність циклу. Тому широко проводяться дослідження щодо зменшення витрати охолоджуючого повітря та розробки високотемпературних сталевих сплавів для жарових труб. В камерах згоряння з використанням вузлів, зокрема, жарової труби з високотемпературної кераміки з'являється можливість роботи без подачі повітря для охолодження стінок жарової труби.

Як показали проведені випробування, температура неохолоджуваної стінки жарової труби із алюмо-боридо-нітрідної кераміки поступово збільшується вздовж камери і на виході ($X = 450 \text{ мм}$) практично дорівнює температурі потоку в граничному шарі, а саме $t_{ж.т} = (0,9 - 0,95) t_{п.г}$, тобто доходила до $1350 \text{ }^\circ\text{C}$. За час проведених стаціонарних випробувань, пусках, остановах і роботі на змінних режимах загалом у декілька десятків годин ніяких пошкоджень і поломок кілець жарової труби не було виявлено.

Висновки. Результати стендових випробувань натурної високотемпературної двозонної камери згоряння з керамічною жаровою трубою із алюмо-боридо-нітрідної кераміки тепловою потужністю

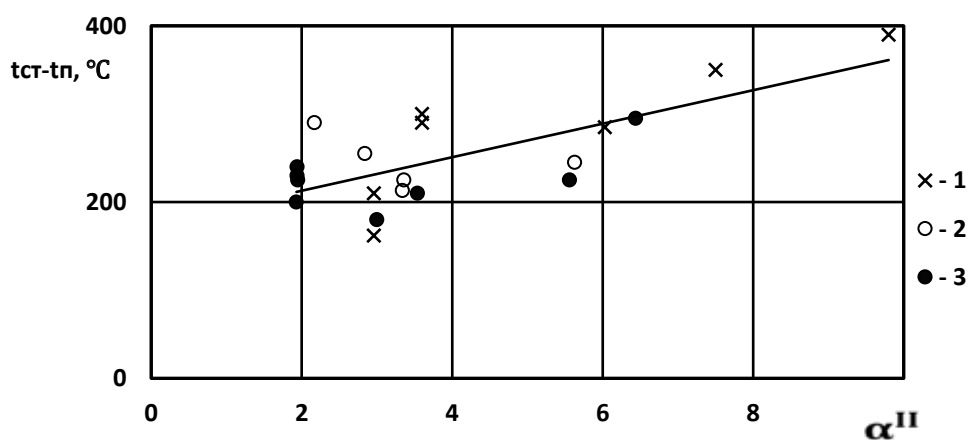


Рис. 7. Залежність різниці температури стабілізатора другої зони і повітря від коефіцієнту надлишку повітря

1 - $t_n = 250 \text{ }^\circ\text{C}$; 2 - $t_n = 350 \text{ }^\circ\text{C}$; 3 - $t_n = 450 \text{ }^\circ\text{C}$.

2,5 МВт для газогенератора показали, що в камері можливе запалювання факелу в кожній зоні при коефіцієнті надлишку повітря в межах $\alpha^I \approx \alpha^{II} \approx 5 \div 6$. Діапазон стійкості факелу по бідному зриву в обох зонах розширюються з підвищенням температури повітря на вході в камеру. При температурі повітря $t_{пв} \geq 350$ °С і газів $t_{пг} \geq 1200$ °С в перерізі вихідної частини мірної ділянки ($X = 450$ мм) спостерігається практично повне вигорання палива. Мінімальна концентрація оксидів азоту на виході з камери ($X = 450$ мм) на режимі при $t_{пв} = 450$ °С і $t_{пг} = 1350$ °С при коефіцієнтах надлишку повітря $\alpha^I = 1,84$, $\alpha^{II} = 2,76$, $\alpha^Z = 2,21$ дорівнює $37,0$ мг/м³. При цьому витрата палива в першу зону складає $G_{r^I} / G_{r^Z} = 0,6$. Максимальну температуру стінки жарової труб із алюмо-боридо-нітридної кера-

міки можна прийняти рівною температурі продуктів горіння на виході з камери згорання, тобто до 1350 °С. За термін роботи у декілька десятків годин ніяких пошкоджень і поломок кілець жарової труби не виявлено. Максимальна температура вихідної торцевої стінки стабілізатора спостерігається на часткових режимах, близьких до режимів бідного зриву ($\alpha^{II} \approx 10$), і перевищує температуру вхідного повітря на 400 °С. На режимах роботи, близьких до розрахункового, така різниця дорівнює близько 200 °С, що свідчить про ефективність прийнятої системи охолодження стабілізатора. Завдяки конструкції камери згорання у вигляді послідовно-паралельно розміщених зон горіння втрати тиску в дослідженнях складали $\sigma_{к.з} = \Delta p_{к.з} / p_{вх} = 0,94$ % при $t_{пв} = 435$ °С, $W_{к} = 18,0$ м/с.

Список літератури:

1. Черноусенко О.Ю., Бутовський Л.С., Грановська О.О., Пешко В.А., Мороз О.С. Вплив роботи у маневрених режимах енергоблоків ТЕС на техніко-економічні характеристики. *Проблеми загальної енергетики*, 2016, вип. 2 (45). – С. 43-51. <https://doi.org/10.15407/pge2016.02.043>
2. Халатов А.А., Карп І.Н., Куцан Ю.Г. Енергетичне газотурбобудування: перспективи використання в енергетиці України. *Вісн НАН України*, 2015. – № 11. – С. 52-58. <https://doi.org/10.15407/vism2015.11.052>
3. Переверзев Д.А., Лебедев А.Г., Шелехина Ж.А. Энергоэффективность объединенных высокотемпературных газотурбинных и паротурбинных блоков. *Пробл. машиностроения*, 2010. – Т. 13. – № 5. – С. 12-18.
4. Емісійні характеристики пальників на базі трубчастих модулів / Любчик Г.М. та ін. *Екотехнології та ресурсозбереження*, 2004. – № 1. – С. 73-79.
5. Сірий О.А. Вплив параметрів струменеві-нішевої системи на робочий процес пальникових пристроїв: дис. ... канд. техн. наук: 05.14.14 / Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», Київ, 2016, 198 с.
6. Черноусенко О.Ю., Бутовський Л.С., Грановська О.О., Мороз О.С., Старченко О.С. Сталість процесу горіння на «бідному» зриві під час мікродифузійного спалювання газу за стабілізатором / *Вчені записки ТНУ імені В.І. Вернадського. Серія: технічні науки*. Том 31 (70). № 2. 2020. С. 182-188. DOI <https://doi.org/10.32838/2663-5941/2020.2-2/31>
7. Черноусенко О.Ю., Бутовський Л.С., Грановська О.О., Мороз О.С., Старченко О.С. Пускові характеристики стабілізаторних пальникових пристроїв при подачі газового палива в зону рециркуляції / *Вчені записки ТНУ імені В.І. Вернадського. Серія: технічні науки*. 2020, Том 31 (70). № 3. С. 158-166. DOI <https://doi.org/10.32838/TNU-2663-5941/2020.3-1/26>
8. Abdulin M., Siryi O., Zhu8chenko A., Abdulin A. Improvement of Reliability of Fire Engineering Equipment Based on a Jet-niche Technology / *Eastern-european journal of enterprise technologies*, 2018, № 2(8), (92), pp. 12-19. DOI:10.15587/1729-4061.2018.126917
9. Сірий О.А., Абдулін М.З. Дослідження енергетичних показників струменеві-нішевої системи спалювання палива / *Вісник Національного технічного університету «ХПІ»*. Серія: Енергетичні та теплотехнічні процеси й устаткування, № 12(1288), 2018. – С. 89-94. Doi:10.20998/2078-774X.2018.12.16
10. Абдулін М.З., Сірий О.А. Дослідження сталості процесу горіння у струменеві-нішевій системі спалювання палива / *Вчені записки ТНУ імені В.І. Вернадського. Серія: технічні науки*. Том 29 (68). Ч. 2, № 1. 2018. С. 158-166. DOI <https://doi.org/10.32838/TNU-2663-5941/2020.3-1/26>
11. Температурні режими зон зворотних токів у ближньому сліді циліндричних стабілізаторів полум'я / М.З. Абдулін та ін. *Науковий вісник НЛТУ України*, 2018, т. 28, № 3. – С. 97-100. <https://nv.nitu.edu.ua>
12. Трубчаста технологія газоспалювання – прорив у енергозбереженні та екологічності транспортування природного газу / Г.Б. Варламов та ін. *Нафтогазова енергетика*, 2020. – № 1. – С. 60-63. <https://elar.nung.tdu.ua/handle/123456789/2745>
13. Черноусенко О.Ю., Бутовський Л.С., Грановська О.О., Мороз О.С., Старченко О.С. Вплив різномірної закрутки повітряного потоку на межі сталості роботи стабілізаторного пальника при мікродифузійному спалюванні газу / *Вчені записки ТНУ імені В.І. Вернадського. Серія: технічні науки*. Том 31 (70). № 4. 2020. С. 155-161. DOI <https://doi.org/10.32838/2663-41/2020.4/22>

Chernousenko O.Yu., Butovsky L.S., Rudik M.A., Dorosevich V.S. BENCH TESTS OF THE FULL-SCALE TWO-ZONE HIGH TEMPERATURE COMBUSTION CHAMBER

The results of bench tests of a full-scale high-temperature two-zone combustion chamber with a capacity of 2.5 MW for a gas generator with an air temperature of 450 °C and a temperature of the exhaust gases of 1350 °C are reviewed. The inner diameter of the ceramic heat pipe of the chamber is 260 mm.

Each of the two fire zones of the chamber has an identical design and is a ring channel with an average diameter of 200 mm and a height of 60 mm. in which the front device is placed in the form of a ring collector-stabilizer with a width of 25.0 mm. Stabilizers on both sides are surrounded by an air flow that passes through channels with a width of 17.5 mm. To intensify the mixture formation and fuel combustion, register vanes are installed on both sides of the stabilize. The registers turn the air jets in different directions at angles of 60° and 45° from the outer and inner sides of the stabilizer. The combustion chamber has a separate supply to both stabilizers, which through the system of holes in the output end is fed into the recirculation zone behind the stabilizers. The gas-air mixture of the first combustion zone is fed into the fire space of the chamber through a central nozzle with a diameter of 100 mm. In the second zone, the process of diffusion combustion of fuel behind the stabilizer takes place. The high-temperature combustion products of the second zone are used to ignite the gas-air mixture that exits through the central nozzle. Due to the identical design of both zones, simultaneous diffusion combustion of fuel in both zones is also possible at partial modes. The results of the tests showed reliable ignition and operation of the camera when changing the speed of the air flow and the coefficient of excess air. There is no mixer in the combustion chamber, which usually serves to reduce the temperature of the gases and form the temperature field. To ensure the possibility of working at high gas temperatures without supplying air to cool the wall, the heat pipe is made in the form of rings made of aluminum-borido-nitride structural ceramics, which could withstand gas temperatures up to 1350 °C and higher. The adopted scheme for the organization of the combustion process made it possible to expand the range of stable operation of the chamber, as well as to reduce emissions of nitrogen oxides. The minimum concentration of nitrogen oxides at the calculated gas temperature is 37.0 mg/m³, which corresponds to the best world standards.

Key words: *two-zone combustion chamber, ring stabilizer, variable swirl, gas-air mixture, diffusion combustion, stability of combustion, ceramic heat pipe, nitrogen oxides.*

МЕТАЛУРГІЯ

УДК 669.23.002.8:626.74.545.

DOI <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2024.2/30>

Єфімова В.Г.

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

Смірнов О.М.

Фізико-технологічний інститут металів та сплавів Національної академії наук України

Горюк М.С.

Фізико-технологічний інститут металів та сплавів Національної академії наук України

Карпунін Є.О.

Фізико-технологічний інститут металів та сплавів Національної академії наук України

ТЕОРЕТИЧНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ ФІЗИКО-ХІМІЧНИХ ТА КІНЕТИЧНИХ АСПЕКТІВ ПРОЦЕСУ ФІЛЬТРАЦІЇ РОЗПЛАВІВ АЛЮМІНІЮ З ВИКОРИСТАННЯМ КЕРАМІЧНИХ ФІЛЬТРІВ

Показано, що алюміній та його сплави є одним з основних конструкційних матеріалів. При цьому існують чисельні проблеми в досягненні високої чистоти розплавів алюмінію. Встановлено, що одним з основних способів рафінування розплавів алюмінію є їх фільтрація крізь керамічні фільтри.

Показано, що чисельні наукові дослідження, присвячені фільтрації розплавів алюмінію від неметалевих включень через керамічні фільтри не висвітлюють фізико-хімічний механізм та кінетичні закономірності видалення неметалевих включень з розплаву алюмінію при його фільтрації.

У цьому дослідженні показано, що процес фільтрації алюмінієвих сплавів від неметалевих включень полягає в динамічному зіткненні частинок з поверхнею фільтра, де відбувається найбільше перемішування ванни рідкого металу, що виникає внаслідок швидкої зміни напрямку потоку та його розриву.

В роботі висвітлено, щоб включення залишалися закріпленими на стінці фільтра, вільна енергія повинна зменшуватись, а інтенсифікуватись цей процес буде за рахунок реакції між включенням і фільтруючим матеріалом, або незмочуваним металом до фільтра і до включення.

У роботі з'ясовано кінетику процесу захоплення неметалевих включень фільтрами, що дозволяє оптимізувати процес фільтрації алюмінієвих розплавів.

Показано, що використання об'ємних фільтрів дає кращі результати фільтрування металу від неметалевих включень, оскільки на вході таких фільтрів відбувається процес глибинної фільтрації.

Встановлено, що такий процес насамперед залежить від таких параметрів як температура металу, хімічний склад фільтрувального матеріалу і неметалічних включень, спроможності до змочування, форми і розподілу каналів у фільтрі.

Визначено, що у глибині фільтру включення рухаються по прямій стінці каналу, що зменшує їх захоплення. Показано, що чим менше перетин каналу, тим більша ймовірність того, що фільтр вловить включення.

Визначено, що при співставленні фільтрів різних типів механізм захоплення неметалевих включень буде різним з часом, оскільки пінокерамічний фільтр переходить у режим фільтраційного осаду після першого його використання.

Встановлено, що при збільшенні швидкості плавлення неметалевого включення на поверхні фільтра спостерігаються дві протилежні тенденції: знижується ефективність фільтрації та зростає кінетичний параметр.

Для прогнозування ефективною роботи фільтру було виведено рівняння яке враховує кінетичні параметри та безпосередньо ефективність фільтрації.

З використанням фізичного моделювання було встановлене оптимальне значення здатності утримувати включення. З цією метою було розроблено експериментальну установку, яка враховувала корозійну природу розплаву алюмінію, умов постійного нагрівання, достатню глибину фільтру та витрати розплаву у певному діапазоні, що відтворює умови роботи фільтру у промислових умовах.

Ключові слова: керамічний фільтр, розплав алюмінію, фільтрація, неметалеві включення, кінетичний параметр, пінокерамічний фільтр.

Постановка проблеми. Механізм фільтрації алюмінієвих сплавів від неметалевих включень полягає в динамічному зіткненні частинок з поверхнею фільтра, де відбувається найбільше перемішування ванни рідкого металу, що виникає внаслідок швидкої зміни напрямку потоку та його розриву. Ефективність фільтрації визначається поведінкою окремих частинок.

Отже визначення умов осадження неметалевих включень на поверхні фільтру в залежності від їх розміру та інтенсивності перемішування, а також матеріалу фільтру є актуальною науковою задачею.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Видалення неметалевих включень з розплаву алюмінію являє собою процес, в якому включення переходять на поверхню керамічного матеріалу, тобто в іншу фазу та залишається в ній [1–3]. Видалення та поглинання неметалевих включень поверхнею керамічного фільтру є одним з найефективніших методів рафінування алюмінієвих розплавів від неметалевої фази з рідкого розплаву.

Для фільтрації розплавів використовується багато видів фільтрів. Вони відрізняються структурою, активною площею та ефективністю. Можна виділити дві основні групи фільтрів, які значно відрізняються за механізмами фільтрації: плоскі та об'ємні [2].

Поступово отвори фільтра заростають та звужуються, що дозволяє видалити навіть невеликі включення розміром 1–5 мкм [3–4]. Об'ємні фільтри, на відміну від плоских, використовують ефект фільтрації на вході фільтра, так і глибину фільтрацію, яка залежить від розміру отворів, їх поперечного перерізу, розподілу та фільтрувального матеріалу. При глибокій фільтрації процес відбувається по всій довжині фільтра і полягає в налипанні неметалевих включень і зчепленні їх з стінками керамічного фільтра. Під час глибокої фільтрації включення оточують керамічний матеріал, а частинки агломеруються, утворюючи перемички з краями, закріпленими на фільтраційних каналах [5]. Ефективність процесу залежить від таких параметрів як температура металу, хімічний склад фільтрувального матеріалу і неметалічних включень, спроможності до змочування, форми і розподілу каналів у філь-

трі. Якщо включення рухається по прямій стінці каналу, ймовірність його захоплення менша, ніж у каналах з більшою кількістю стінок. Чим менше перетин каналу, тим більша ймовірність того, що фільтр вловить включення.

Керамічні фільтри повинні витримувати високотемпературні режими (до 1700°C) та високу проникаючу здатність розплаву металу. Це пояснює неможливість застосування пінокерамічних фільтрів [6].

Матеріалом таких фільтрів є оксиди алюмінію, оксиду алюмінію з графітом, оксидом циркону або кварцу. Матеріали на основі оксиду алюмінію ефективні для фільтрації. Стійкість до термічних ударів у них не дуже висока, але інші властивості, а саме висока температурна стійкість, твердість і стійкість поверхні до ерозії говорять про їхню придатність. Стійкість до термічного удару можна покращити, додавши оксид циркону. Найвищу міцність і стійкість до повзучості мають агломерати, виготовлені з дрібнодисперсного оксиду алюмінію з невеликою кількістю оксиду магнію або інших сполук, що перешкоджають росту зерен.

Постановка завдання. Метою даного дослідження було встановлення механізму захоплення неметалевих включень з розплаву алюмінію поверхнею фільтра.

Реалізація поставленої мети здійснювалась шляхом вирішення наступних завдань:

- кінетичний аналіз захоплення частинок неметалевих включень поверхнею фільтра;
- моделювання процесу розливання розплаву алюмінію крізь пінокерамічні фільтри різної товщини;
- визначення сприятливих умов захоплення неметалевих включень пінокерамічним фільтром.

Виклад основного матеріалу. Відомо, що розплавлений Al настільки активний, що може легко вступати в хімічну реакцію з киснем, водою з утворенням включень Al_2O_3 у процесі плавлення. Однак деякі інші включення (TiB_2 , Al_4C_3 , $MgAl_2O_4$ та ін.) утворюються в результаті електролітичного процесу. В умовах турбулентного потоку включення у розплавленому алюмінії розподіляються нерівномірно. Найвність неметалевих включень призводить до

утворення дефектів у готовому продукті. Отже стає зрозумілим, що очищення розплавленого алюмінію від неметалевих включень є однією із найважливіших задач для покращення якості алюмінієвих сплавів.

Фільтрація алюмінієвих розплавів зменшує кількість включень, які можуть призвести до дефектів лиття; усуває бульбашки в металі; регулює та гомогенізує потік металу, зменшує окислення та покращує якість лиття.

При взаємодії включення зі стіною фільтра сила зчеплення повинна бути достатньо великою, щоб протистояти силі металу, що тече, і запобігти знесення неметалевої частинки у потік металу. Міцність зчеплення залежить від значення поверхневої енергії на межі поділу фаз включення – фільтр, метал – фільтр та метал – включення. Отже зміна вільної енергії в процесі відокремлення неметалевого включення від розплаву та осідання її на поверхні фільтра можна представити як:

$$\Delta G = \sigma_{\sigma-\phi} - \sigma_{\phi-p} - \sigma_{p-\sigma}, \quad (1)$$

де $\sigma_{\sigma-\phi}$ – поверхневий натяг на межі поділу фаз включення – фільтр, Дж/м²; $\sigma_{\phi-p}$ – поверхневий натяг на межі поділу фаз розплав – включення, Дж/м².

Швидкість зміни захопленого включення на одиницю об'єму фільтра буде функцією концентрації включень:

$$\frac{\partial \gamma}{\partial \tau} = K C, \quad (2)$$

де K – кінетичний параметр, C – концентрація неметалевих включень у розплаві алюмінію, моль/кг; τ – характерний час, с; K – функція концентрації захоплених включень γ , яка залежить від швидкості течії розплаву, а також форми та розміру включень. Кінетичний параметр K можна представити як:

$$K = K_0 \left(1 - \frac{\gamma}{\gamma_m} \right), \quad (3)$$

де K_0 – коефіцієнт кінетичного параметра, γ_m – спроможність поверхневого шару фільтра утримувати включення, моль/кг.

Якщо припустити, що поверхня фільтра має гарну спроможність утримувати включення, тоді значення $\frac{\gamma}{\gamma_m} \rightarrow 0$, тоді рішення диференційного рівняння (3) буде мати вигляд:

$$\frac{C(Z)}{C_i} = \exp\left[-\frac{K_0 Z}{U_m}\right], \quad (4)$$

де Z – глибина фільтра, м, U_m – швидкість розплаву, м/с; C_i – концентрація неметалевих включень на вході в фільтр, моль/кг.

Концентрацію включень на виході з фільтра може бути описана рівнянням:

$$\frac{C_0}{C_i} = \exp\left[-\frac{K_0 L}{U_m}\right], \quad (5)$$

де C_0 – концентрація на виході з фільтра, моль/кг; L – висота фільтрувального шару, м.

Значення C_i , C_0 , U_m та L можуть бути знайдені експериментально, а значення K_0 можна обчислити за рівнянням (5). Тоді рівняння (5) можна перетворити і записати як:

$$\frac{1}{U_m} = \frac{1}{K_0 L} \ln\left(\frac{C_i}{C_0}\right), \quad (6)$$

З рівняння (6) випливає, що K_0 не є функцією швидкості розплаву, отже тоді графік в координатах $\frac{1}{U_m}$ від $\ln\left(\frac{C_i}{C_0}\right)$ буде мати вигляд прямої з кутовим коефіцієнтом $\frac{1}{K_0 L}$, який буде проходити через початок координат.

З рівняння (6) випливає, що кінетика захоплення неметалевих включень залежить:

- 1) від геометрії фільтра (товщини, пористості, розмір, геометрії потоку);
- 2) змінних, що модулюють швидкість потоку розплаву.

Фільтр, що має відносно велику спроможність утримувати неметалеві включення при тривалому використанні може бути заблокованим.

Отже для встановлення оптимального значення утримуючої спроможності фільтра нами було проведено експериментальні дослідження з використанням системи модельного розплаву AI-TiB₂.

Для цього нами було розроблено експериментальну установку, яка враховувала корозійну природу розплаву алюмінію, умови постійного нагрівання, достатню глибину фільтра та витрати розплаву у діапазоні 1–17 кг/м² · с, що відтворює умови роботи фільтра у промислових умовах.

Експериментальна установка складалася з печі опору. Для моделювання процесу фільтрації у середині печі було встановлено сталеву трубу, яка була адаптована для відтворення процесу фільтрації. Спосіб приготування фільтра залежить від типу фільтра.

У дослідженнях було використано три конфігурації глибинного шару фільтрів:

- 1) 25 см з круглого глинозему діаметром 2 см;
- 2) 25 см з пластинчастого глинозему 1–3 мм;

3) 5 см з таблетованого глинозему товщиною 1–3 мм, використовувалось у якості порівняння.

Для фільтрації нагрівали 70 кг розплаву алюмінію до температури 750 °С. У якості індикаторів ефективності фільтрації було обрано частинки TiB_2 . Для утворення цих «штучних включень» попередньо було визначено кількість титану дибориду (Al-5% Ti – 1% B), що було додано до розплаву. У якості «штучних включень» титан диборид було обрано з наступних причин:

1) розмір частинок TiB_2 мають критичний діапазон розмірів в межах 1–30 мкм, необхідний для цього дослідження;

2) простота кількісного аналізу Ti і B в алюмінії за допомогою спектрографічних і металографічних методів;

3) наявність лігатур Al-Ti-B.

Відфільтрований метал збирали через певні проміжки часу під вихідним отвором фільтру за допомогою серії форм та визначали його вагу. Це дозволяло розрахувати швидкість потоку через фільтр. Передбачалося, що при температурі фільтрації весь присутній бор був хімічно зв'язаний з титаном.

Результати досліджень свідчать, що ефективність фільтрації знижується зі зростанням швидкості розплаву. При цьому всі фільтри показали однакову ефективність фільтрації.

Для порівняння фундаментальних характеристик фільтру нами було визначено параметр K_0 , що є характеристикою кінетики захоплення

частинок та визначається для кожного фільтра як функція швидкості потоку та показує кількість захоплених включень у одиницю часу. Результати цих досліджень наведено на рис. 1 та рис. 2. Лінійні залежності на цих рисунках було визначено методом найменших квадратів. Результати досліджень свідчать, що у всіх випадках кінетика захоплення включень зростає зі збільшенням швидкості розплаву.

Отже результати досліджень показали, що збільшення швидкості розплаву призводить до двох суперечливих тенденцій: зниженню коефіцієнту корисної дії в процесі фільтрації та зростання кінетичного параметру.

Для прогнозування ефективної роботи фільтру ми замінюємо C_0 у рівнянні 8 на наступний вираз:

$$\eta = \frac{C_i - C_0}{C_i} = 1 - \exp\left[-\frac{K_0 L}{U_m}\right] \quad (7)$$

Як можна бачити з рівняння (10) співвідношення кінетичного параметру до швидкості розплаву визначає ефективність фільтрації. Отже співвідношення $\frac{K_0}{U_m}$ визначається як коефіцієнт фільтрації λ :

$$\lambda = 1 - e^{-\lambda L} \quad (8)$$

Дані розрахунків наведено на рис. 3 свідчать про те, що висока ефективність фільтрації досягається при меншій швидкості розплаву. При цьому швидкість розплаву не може бути обмежена вимо-

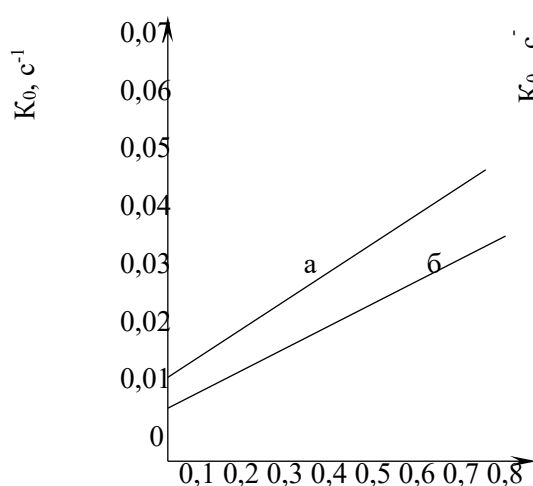


Рис. 1. Залежність кінетичного параметру а) 25 см пластинчастого глинозему; б) 25 см круглого глинозема

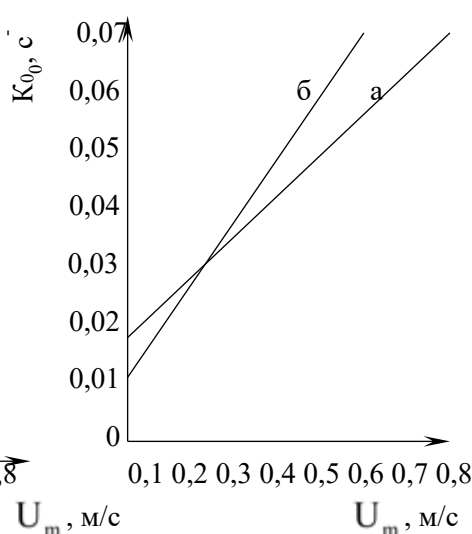


Рис. 2. Залежність кінетичного параметру від швидкості розплаву: а) 5 см таблетованого глинозему; б) пінний керамічний фільтр

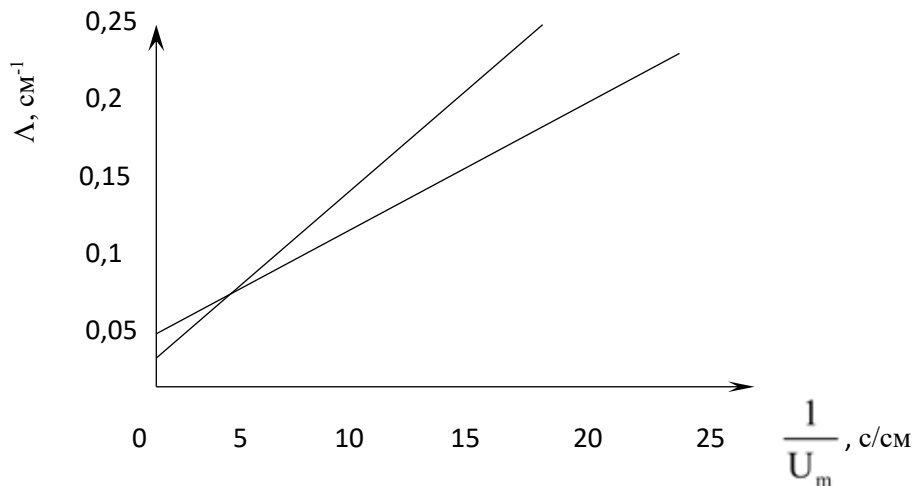


Рис. 3. Залежність коефіцієнта фільтрації від оберненої швидкості:
а) 25 см пластинчастого глинозему; б – круглого глинозему

гами виробництва, а отже для досягнення ефективних умов фільтрації необхідно збільшувати довжину фільтрів.

Висновки і пропозиції. У результаті проведеної роботи було запропоновано математичне описання кінетичної моделі закріплення частинок неметалевих включень на поверхні фільтру. Модель описує кінетику видалення включень в залежності від

швидкість потоку розплаву. Теоретична модель була підтверджена експериментальними дослідженнями. Експерименти показали, що пінокерамічні фільтри різної товщини на ранніх стадіях фільтрації мають однакові характеристики.

Наступним етапом наших досліджень буде вивчення впливу природи неметалевих включень на їх осадження на поверхні фільтру.

Список літератури:

1. Massanabadi M., Akhtar S., Aune R. Effect of flow velocity on the permeability of ceramic foam filters (CFFs). *Result in materials* 2024. Vol. 21. p. 78-84.
2. Gehre P., Takht Firouzehb S., Schmidta G., Dudcziga S., Kieferb B., Aneziris C.G. Flame-sprayed alumina molten metal filters for dead-mould casting application. *Open Ceramics*. 2023. Vol. (13). pp. 79-94.
3. Ningjie S., Zhe W., Bolin S., Yuan L., Zhancheng G. Purification of primary aluminum liquid through supergravity-induced filtration. *Chemical Engineering and Processing – Process Intensification*. 2022. Vol. 182. №.6. pp.234-357.
4. Hassanabadi M., Berto T., Akhtar S., Aune E. Hydraulic Characterization of Ceramic Foam Filters Used in Aluminum Filtration. *Materials*. 2023. Vol. 16(7). pp. 56-84.
5. Gehre P., Takht Firouzehb S., Schmidta G., Dudcziga S., Kieferb B., Aneziris C.G. Flame-sprayed alumina molten metal filters for dead-mould casting application. *Open ceramics*. 2023. Vol.15. pp. 45-61.
6. Voigt C., Hubáková J., Zienert T., Fankhänel B., Stelter M., Charitos A., Aneziris G. Aluminum Melt Filtration with Carbon Bonded Alumina Filters. *Materials*. 2020. Vol.13. pp. 78-94.

Yefimova V.G., Smirnov O.M., Goruk M.S., Karpuhin Ye.O. THEORETICAL STUDY OF PHYSICO-CHEMICAL AND KINETIC ASPECTS OF THE PROCESS OF FILTRATION OF ALUMINUM MELTS USING CERAMIC FILTERS

It is shown that aluminum and its alloys are one of the main structural materials. At the same time, there are numerous problems in achieving high purity of aluminum melts. It has been established that one of the main methods of refining aluminum melts is their filtration through ceramic filters.

It is shown that numerous scientific studies devoted to the filtration of aluminum melts from non-metallic inclusions through ceramic filters do not shed light on the physico-chemical mechanism and kinetic patterns of removal of non-metallic inclusions from the aluminum melt during its filtration.

This study shows that the process of filtering aluminum alloys from non-metallic inclusions consists in the dynamic collision of particles with the filter surface, where the greatest mixing of the liquid metal bath occurs, resulting from a rapid change in the direction of the flow and its discontinuity.

The paper highlights that in order for the inclusions to remain attached to the filter wall, the free energy must decrease, and this process will intensify due to the reaction between the inclusion and the filter material, or non-wettable metal to the filter and to the inclusion.

The kinetics of the process of capture of non-metallic inclusions by filters is clarified in the work, which allows to optimize the process of filtering aluminum melts.

It is shown that the use of volumetric filters gives better results in filtering metal from non-metallic inclusions, since a deep filtering process takes place at the entrance of such filters.

It was determined that in the depth of the filter, the inclusions move along the straight wall of the channel, which reduces their capture. It is shown that the smaller the channel cross-section, the greater the probability that the filter will catch inclusions.

It was determined that when comparing filters of different types, the mechanism of capture of non-metallic inclusions will be different over time, since the foam ceramic filter goes into filter sediment mode after its first use.

It was established that with an increase in the melting rate of non-metallic inclusions on the surface of the filter, two opposite trends are observed: the filtration efficiency decreases and the kinetic parameter increases.

To predict the effective operation of the filter, an equation was derived that takes into account the kinetic parameters and the filtration efficiency directly.

With the use of physical modeling, the optimal value of the ability to hold inclusions was established. For this purpose, an experimental setup was developed that took into account the corrosive nature of aluminum melt, constant heating conditions, sufficient filter depth and melt flow rates in a certain range that reproduces the conditions of filter operation in industrial conditions.

Key words: *ceramic filter, aluminum melt, filtration, non-metallic inclusions, kinetic parameter, foam ceramic filter.*

ХІМІЧНІ ТЕХНОЛОГІЇ

УДК 66.041

DOI <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2024.2/31>

Витяганець В.С.

Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут»

Пітак І.В.

Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут»

ОПТИМІЗАЦІЯ РЕЖИМУ РОБОТИ ТА КОНСТРУКЦІЇ ШАХТНОЇ ПЕЧІ ДЛЯ ВИРОБНИЦТВА ВАПНА

Металургійне виробництво вапна, хоча й відіграє ключову роль у будівельній сфері та інших галузях економіки, але є надзвичайно енергоємним і трудомістким процесом. Особливо важливою проблемою є великий викид CO_2 під час кальцинації, який становить половину загальних викидів CO_2 у руді. Закриття карбонізаційних установок стає актуальним завданням для екологічної політики. Основна мета виробництва вапна – забезпечення високої якості продукції та постійне покращення умов праці з метою зменшення негативного впливу на навколишнє середовище. Однак, основний фактор витрат – енергія, необхідна для випалу вапняку, що робить управління цим процесом надзвичайно важливим, особливо у зв'язку з постійним зростанням вартості енергоносіїв. Стаття розглядає різні аспекти оптимізації робочого режиму та конструкції шахтних печей для виробництва вапна. Досліджуються технологічні та інженерні аспекти, такі як вибір типу печі, оптимізація процесу випалу вапняку та вплив конструкції печі на якість та кількість виробленого вапна. Головна мета – забезпечення максимального виходу продукції за мінімальних витрат сировини, енергії та зменшення впливу на навколишнє середовище. Висновки досліджень показують, що реконструкція шахтних печей може значно знизити витрати палива та підвищити вміст корисних компонентів у вапні. Ефективне управління процесом випалу вапняку може забезпечити стабільні результати навіть за різних умов роботи печі. Оптимізація температурного режиму та використання принципу теплообміну за прямоточно-протитечійною схемою можуть значно покращити продуктивність та зменшити вплив на довкілля. Встановлено, що один із потенційних шляхів удосконалення шахтних печей із прямим профілем футерування полягає у переході до принципу теплообміну за прямоточно-протитечійною схемою та створенні нижнього контуру для рециркуляції продуктів згоряння, які потім спалюються у суміші з паливом та повітрям. Ця ініціатива має потенціал збільшити продуктивність після реконструкції печі на 15–20%.

Ключові слова: вапно, промислове зростання, випал, кінетика процесу, гранулювання, математична модель, охолодження, адсорбція, газоподібні викиди.

Постановка проблеми. Металургійне виробництво вапна трудомістке і потребує великих витрат енергії. Викиди CO_2 у процесі кальцинації у виробництві вапна становлять 50% загальних викидів CO_2 у руді та закриття карбонізаційних установок є важливою проблемою екологічної політики. Основна увага приділяється властивостям вапна для забезпечення її якості та правилам, що регулюють процес, із постійним покращенням умов праці; її основна мета – зменшити вплив на навколишнє середовище. Оскільки енергія, необхідна для випалу вапняку, сильно пов'язана з температурою та спорідненістю реакції карбонізації

саме ця частина всього процесу є найбільш ефективною з точки зору енергії. Це питання є більш актуальним через невпинне зростання вартості енергоносіїв. Управління ними в ідеальних умовах значною мірою сприятиме зменшенню впливу на навколишнє середовище. У цьому дослідженні детально розглядаються та пропонуються кілька варіантів перспектив мінімізації енергії у виробництві вапна.

Аналіз основних досліджень і публікацій. Виробництво вапна в шахтних печах є важливою галуззю промисловості, яка забезпечує необхідність у цьому стратегічному будівельному

матеріалі для різних галузей економіки. Однак, збільшення конкуренції та необхідність зниження витрат виробництва вимагають постійного вдосконалення технологічних процесів та оптимізації робочих умов [1–4].

Оптимізація режиму роботи та конструкції шахтних печей для виробництва вапна відіграє важливу роль у забезпеченні ефективності та економічної доцільності виробництва. Це полягає в пошуку оптимальних параметрів процесу випалу вапняку, які забезпечують максимальний вихід продукції при мінімальних витратах сировини, енергії та забруднення навколишнього середовища [5].

У даній статті розглянуто різні аспекти оптимізації режиму роботи та конструкції шахтних печей для виробництва вапна. Будуть розглянуті технологічні та інженерні аспекти, такі як вибір підходящого типу печі, оптимізація процесу випалу вапняку, вибір оптимальних параметрів режиму роботи печі, а також вплив конструкції печі на якість та кількість випаленого вапна [6, 7].

Досягненням оптимальної роботи та конструкції шахтної печі може бути збільшення продуктивності підприємства, зменшення витрат на виробництво, підвищення якості виробленого вапна та зменшення негативного впливу на навколишнє середовище.

Постановка завдання. Метою статті є отримання поведінки різних енергетичних і матеріальних потоків, а також використання його в майбутньому для перевірки можливих модифікацій установки.

Виклад основного матеріалу. Виробництво вапна є життєво важливим етапом для виробництва як основних продуктів, таких як чорних металів так і супутніх продуктів у промислових умовах. У світі щорічно виробляється значна кількість чорних металів, що сприяє широкому асортименту експорту. Кількість заводів, які беруть участь у виробництві чорних металів, малих і великих, перевищує 200, і всі ці підприємства використовують такі процеси.

Ця частина дослідження полягає в тому, щоб закласти основу для обговорення шахтних печей, конструкцій шахтних печей і режимів роботи в наступних частинах огляду літератури, щоб повністю зрозуміти рівень технології. Звичайно, слід зазначити, що повний дискурс науки про чорну металургію та виробництво вапна справді виходить за рамки цієї частини дослідження. Однак, забезпечивши базову основу знань у цих областях, буде надано комплексну структуру,

з якої можна почати аналіз цієї складної галузі. Такий аналіз важливий з ряду причин. По-перше, технологія, яка використовується в цій галузі, все ще розвивається і поки що не повністю зрозуміла тим, хто не має безпосередньої участі в галузі. По-друге, економіка виробництва вапна відіграє невелику, але важливу роль у світовій економіці, де певні країни залежать від металів.

Виробництво вапна в чорній металургії. Вапно використовується в чорній металургії для виробництва сталі і одержується випалом вапняку при високих температурах. Металургійні заводи не в змозі виробляти вапняк, необхідний для виробництва, і закуповують його від незалежних постачальників. *Вапно* – це продукт випалу вапняку, крейди та інших карбонатних порід. Найчастіше під назвою вапна об'єднують негашене CaO (окис кальцію) та продукт його взаємодії з водою – гашене Ca(OH)₂ (гідроокис кальцію). За фракційним складом воно поділяється на грудкове і мелене (порошкоподібне). Вапно використовується на очисних спорудах питної води для пом'якшення рН води, як антисептик. Випалене вапно також є основним інгредієнтом у цементній промисловості. Світове виробництво вапна становить приблизно від 350 до 300 мільйонів метричних тон, з яких приблизно 15 тон отримують в Індії. Стрімке зростання населення в усьому світі породило попит на використання якісної питної води. Шкіряні заводи та желеподібні підприємства також споживають вапно окремо. Вапно є одним із агентів, який продається як товар. Галузі промисловості, в основному споживчі, належать до дрібних галузей промисловості, і вапняк має тут дуже велику частку. Найважливішим використанням вапна є синтез на заводах кальцинованої соди.

Режими роботи та конструкції шахтних печей. Перш ніж приступати до вибору способу встановлення шахтних печей, важливо застосувати різні методи експлуатації та проектування. Тут, у реверсивній конструкції шахтних печей у виробництві вапна, робочі параметри спрямовані на те, щоб забезпечити контроль типу повітря, що надходить і виходить з печей. Контроль потоку повітря здійснюється в нижній частині печей, і це контролюється за допомогою приводу, а також керованого клапана. Крім того, піч має систему збору газу в ній, і це необхідно спеціально для цілей ламінарного газу. Газ у зоні фретингу збирається окремо, і це необхідно, тому що процес фільтрації повинен мати додаткове первинне повітря. Важливість встановлення режиму роботи та проектування робочих моделей шах-

тних печей покращує якість вапняної продукції, що виробляється, а також знижує рівень забруднення атмосфери.

Технології оптимізації у виробництві вапна.

Оптимізацію виробництва вапна можна здійснити кількома різними способами, кожен з яких представляє окремий параметр. У першому варіанті було зроблено 11 прогонів, враховуючи варіації тиску повітряної кришки, що призвело до питомого споживання 289 кг від'ємного CaO, що призвело до втрати від випалу CaCO_3 до CaO та CO_2 в умовах, відібраних у діапазоні змінних для параметрів. Значення були відібрані для кожного випадку, інші залишалися фіксованими, тиск повітряної кришки становив 22,5 мм H_2O . Оптимальним діапазоном параметра був 1,55–1,75 (нормований тиск). Будь-які невідповідні умови, які можуть призвести до надмірного споживання, можна розглядати як агресивну роботу та вказувати на важливість нормального діапазону для оптимізації питомого споживання.

Збір даних. За допомогою первинних даних отримано первинну інформацію, необхідну для проектування печі для виробництва вапна в чорній металургії. Основною сировиною для виробництва вапна в печі є вапняк, газоподібне паливо і повітря. Дані для кожного з вищезазначених трьох параметрів були зібрані та використані для дослідження.

Для перевірки правильності запропонованої моделі печі були проведені експериментальні випробування, де використовується однокамерна піч. Установка включала вісім різних вимірювальних виходів для реєстрації температури в камері, температури димових газів, вмісту CaO (який не прореагував) у вапні та його реакційної здатності. Профіль температури всередині печі по її довжині від точки впорскування палива до точки викиду вапна було зареєстровано та проаналізовано. Відповідно до запропонованої моделі змінено конструкцію печі та режим її роботи.

Залежними змінними для дослідження є виробництво вапна (CaO) з вапняку (CaCO_3) і спалювання монооксиду вуглецю. Виробництво вапна залежить від температури і тиску, що створюється всередині печі. Згоряння оксиду вуглецю також залежить від кількості введеного повітря та загальної ефективності реакції. Ця ефективність – це ступінь, до якого CO окислюється до CO_2 , а вироблене тепло використовується для ендотермічних реакцій у печі.

Оптимізаційні моделі. Розроблено математичну оптимізаційну модель для оцінки опти-

мального режиму роботи шахтної печі, а також для визначення необхідної конструкції печі. Модель здатна перемикатися між двома режимами роботи, нормальним і холостим, а також між двома різними конструкціями печі. Мета використання моделі полягає в тому, щоб визначити режим роботи печі, а також найкращу можливу схему для системи печі, щоб загальна ефективність процесу виробництва вапна була максимальною.

Обговорення результатів. Оптимальні режими роботи печі для випалу вапняку були визначені в результаті експерименту як «оптимальний режим» для спалювання негашеного вапна у печі. Поточна пропускна здатність вапна, а також виміряна пілотна радіоактивність для кисню становила 0,14 м³ паливного повітря на 1,772 м² поверхні печі. Ці пілотні результати відповідають за комерційну експлуатацію. Що стосується якості вапна, то для фракції вапна від 50 мм до 70 мм було розраховано вміст активного вапна. Ці результати порівнювали зі стандартними існуючими результатами якості вапна.

При найнижчій температурі шару на виході з печі спостерігалось підвищення від 1350 до 1450 К. Для температур на глибині від 0,8 до 1,0 м у печі різниця була нижче 30 К. Таким чином, різниця спостерігалась лише для температур на виході з печі. Основною причиною падіння температури були заводські налаштування контролера. Збільшення товщини шару не було виконано через аномальне зростання товщини футеровки. Результати показують, що протягом половини досліджуваного періоду налаштування заводського контролера мали позитивний вплив на температуру шару та теплові характеристики печі. Час охолодження надавав більше тепла матеріалу для досягнення бажаної температури, а отже, потрібно менше тепла з пальників, що може призвести до економії палива. Однак ця економія не була кількісно визначена. Важливо також відзначити, що обидва ці параметри пропонують переваги контролю, тобто матеріал і тепло, які необхідно забезпечити для досягнення бажаної температури в футерівці.

Визначення оптимальної конструкції печі та робочих параметрів залежало від вимог до вапняку та газоподібного палива, а також від домішок, які є результатом завантаження валунів, і мотивації для збільшення рівнів переробки. Дані були зібрані для чотирьох різних експериментів з належним урахуванням викидів та паливної ефективності. Проведено хімічний аналіз домішок у валунній шихті та низькосортному вапняку. Послідовні дані виявилися більш надійними, ніж

дані про склад, що визначають якість валунів і вапняку. Було визначено, що збільшення споживання вапняку не принесло жодної користі через доступний простір шару та висушене та попередньо нагріте повітря для горіння. Задовільне виробництво вапна вимагало введення достатньої кількості кисню для окислення заліза з валунів у пласті донної зони, а отриманий оксид кальцію мав бути бажаної якості.

Однією з ключових переваг металургійної промисловості є здатність рекуперувати тепло з гарячих димових газів, які утворюються та виводяться з процесу. Було виявлено, що приблизно 80% теплової енергії використовується, а решта викидається в атмосферу як відходи через димові гази. Це дозволяє уникнути великих втрат енергії разом із контролем забруднення атмосфери. На металургійному заводі є багато відходів, які потрібно використовувати в процесі, щоб мінімізувати рівень забруднення.

Металургійне виробництво найбільш вимогливе до такого показника, як час гасіння вапна водою, що визначає її реакційну здатність. Огляд літератури показав, що швидкість гасіння вапна залежить від її хімічного складу, особливо вмісту домішок, температури отримання та кристалічної будови вапняку. У літературі викладено висновки про якісний взаємозв'язок температури випалу вапна зі швидкістю її гасіння водою [8, 9], однак експериментальних даних, які свідчать про цю залежність, виявити не вдалося. Тому у роботі проведено відповідні експерименти.

В умовах роботи промислової печі шматок вапняку не завжди прогрівається до потрібної температури на всю свою глибину, його поверхневий шар, навпаки, перегрівається, тому і реакційна здатність отриманого вапна буде іншою. Таким чином, залежність швидкості гасіння вапна водою в умовах шахтного випалу повинна бути доповнена з урахуванням крупності шматків вапняку та тривалістю витримки.

Металургійні підприємства, що постачають чорний прокат за кордон повинні відповідати стандарту ISO 9001:2000. Цей стандарт передбачає виконання міжнародних вимог системи управління якістю на всіх етапах випуску продукції, включаючи і сертифікацію допоміжних виробництв. Тому методи випробувань вапна повинні відповідати вимогам чинного в ЄС стандарту DIN/EN 459-2 [10].

У стандарті DIN/EN 459-2 під реакційною здатністю (часом гасіння вапна водою) мається на увазі відрізок часу, за який температура реагує

суміші досягає 60°C. За тривалість гасіння приймають час із моменту додавання води на початок періоду, коли зростання температури вбирається у 0,25°C на хвилину, тобто. до досягнення максимальної температури суміші, що реагує.

Шматок вапняку масою 70–100 г поміщався в муфельну піч, де витримувався при фіксованій температурі протягом 8 годин – часу, достатнього для повного завершення дисоціації карбонатів та рівномірного прогрівання шматка на всю глибину до температури муфеля. Після виїмки та охолодження в ексикаторі вапно подрібнювалося у ступці, отримане вапняне борошно просівалося через сито № 008. Потім з просіву відбиралася навішування, маса якої в грамах розраховувалася за формулою $G = 1000/A$, де A – вміст активних оксидів кальцію та магнію вапна.

Для визначення температури та часу гасіння вапна використовували побутовий термос місткістю 500 мл. Наважка поміщалася в термосну колбу, після чого до неї додавали 25 мл води, що має температуру 20°C, і суміш швидко перемішувалася дерев'яною відполірованою паличкою. Після цього колба закривалася пробкою із щільно вставленим термометром на 150°C і залишалася у спокої. Відлік температури реагування суміші вівся з моменту додавання води. У ході спостережень фіксувалися: час досягнення сумішшю температури 60°C, максимальна температура суміші та час закінчення реакції (коли зростання температури знижувалося до 0,25°C за хвилину).

Аналіз були піддані вапняки Вінницького (В1), Донецького (Д1) родовищ, які за хімічним складом задовольняють вимогам до виробництва металургійного вапна. Випал проводився при температурах від 900 до 1300°C у трьох повторних дослідах. Результати аналізів наведено на Рисунок 1.

Аналізуючи графіки реакційної здатності вапна, отриманої при різних температурах можна помітити, що зв'язок температури випалу вапняку з тривалістю процесу гідратації вапна можна описати кусково-заданою функцією, за рідкісним винятком, лінійної на інтервалах температур випалу 900–1000°C, 1000–1200°C та 1200–1300°C. Зв'язок максимальної температури гідратації з температурою випалу можна описати лінійною залежністю, але вона є визначальним показником, далі ця характеристика не розглядається.

У проведених дослідах за рахунок подовження витримки досягався повний випал вапняку та рівномірне прогрівання каменю на всю глибину. При випалюванні в реальних умовах поле температур за радіусом шматка нерівномірне. Зовнішній шар

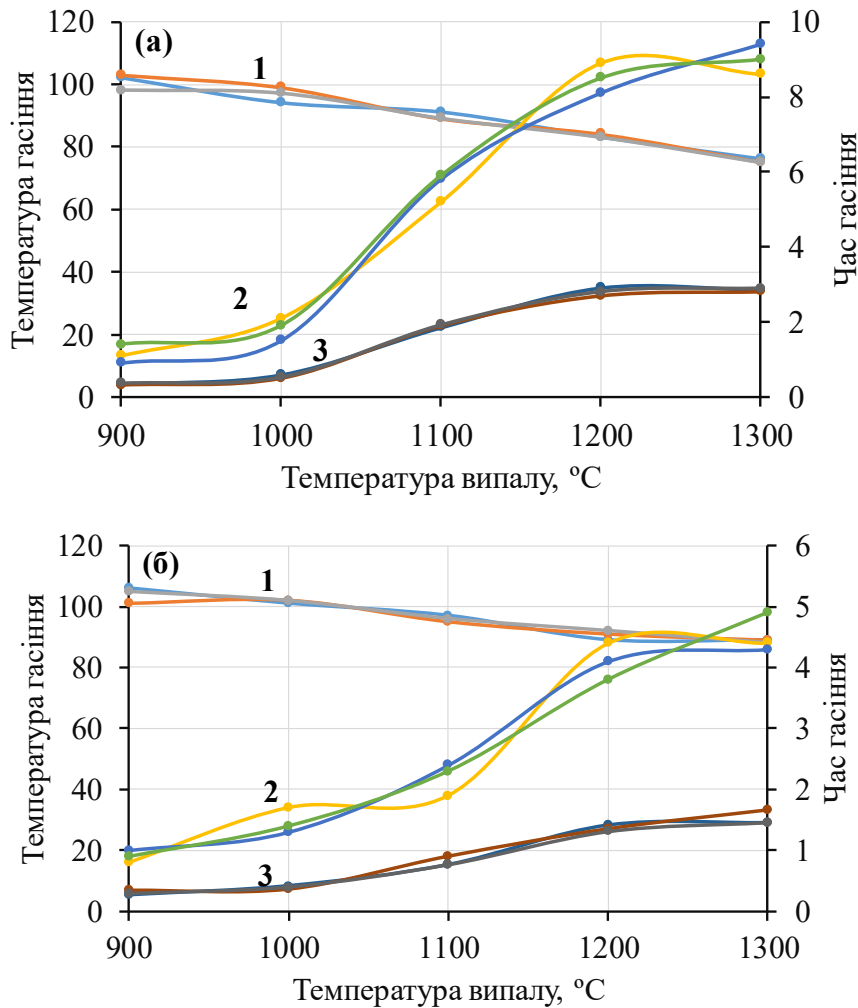


Рис. 1. Результати випробувань реакційної здатності вапна: а – проба В1, б – проба Д1. 1 – температура гасіння, 2 – Час гасіння за ДСТУ 9179-77, 3 – Час гасіння за DIN/EN 459-2

каменю піддається впливу високих температур пічних газів, що омивають його, температура ж у фронті реакції (за умови неповного завершення випалу), як показали розрахунки, не перевищать 900°C. Тому у випадку з шматковим вапняком, який перебував при різних температурах, експертним шляхом оцінити середній час гасіння вапна важко, і необхідно розробити методику прогнозуючого розрахунку реакційної здатності вапна, отриманої зі шматкового вапняку. Виконавши розрахунок розподілу температур по радіусу кулястої гранули в момент, що відповідає її максимальному прогріву, не важко розрахувати середню температуру шматка за формулою

$$\bar{T}_{gr} = \frac{1}{V_{gr}} \cdot \int_0^V T_{gr} dv \text{ або } \bar{T}_{gr} = \frac{3}{R^3} \cdot \int_0^R r^2 T_{gr}(r) dr \quad (1)$$

Аналогічно можна розрахувати і середню тривалентність гідратації речовини гранули, вибравши одну із залежностей

$$\bar{\tau}_{react} = \frac{3}{R^3} \cdot \int_0^R r^2 f(T_{gr}) dr \quad (2)$$

Для засипання гранул різної крупності час гідратації суміші обчислюється за формулою

$$\bar{\tau}_{react.mix} = \sum \bar{\tau}_{react} m_i \quad (3)$$

де m_i – масова частка гранул i -го класу крупності.

За допомогою виразу (3) апіорно може бути розрахована реакційна здатність випаленого вапна будь-якого класового складу, якщо відома залежність часу гасіння від температури випалу для даного виду вапняку та розподіл температур по радіусу гранули в момент найвищого прогріву.

Оптимізація випалу вапняку у печі. Розглянута піч для випалу вапняку потужністю 12–20 тон продукції щоденно. Шахта має робочу висоту 7,7 м, а загальна висота становить 9,9 м. У печі встановлено 8 газо-повітряних пальни-

ків з регульованою потужністю, що дозволяє змінювати продуктивність в залежності від потреби. Газові пальники розташовані у водоохолоджувальних фурмах, які висуваються усередину печі. Завантаження та вивантаження продукції відбувається періодично. Механізм завантаження шибєрного типу без герметизації, що здійснюється по мірі спустошення завантажувального бункера. Механізм вивантаження також шибєрного типу, без герметизації, розташований центрально, з вивантаженням у контейнери за необхідності.

Експлуатація водоохолоджуваних фурм часто супроводжувалася утворенням сольових відкладень через використання технічної води без додаткового знесолення. Для заміни цих фурм піч зупинялася на ремонтні роботи. Інша негативна характеристика фурм це втрати тепла через охолодження водою. Згідно з тепловим розрахунком, близько 2,5% тепла, що вводилось у піч, безповоротно губилося через охолодження на кожній фурмі, і загальні втрати становили близько 20%. Було прийнято рішення про реконструкцію печі з відмовою від водяного охолодження пальних пристроїв.

Демонтаж фурмених пристроїв означав, що в новій конструкції пальники будуть розміщуватися без можливості висування у внутрішній простір. Під час реконструкції печі змінювався профіль внутрішнього перерізу, здійснювався «пережим» шахти вище за пальникові пристрої, що запобігало закупорці пальників і дозволяло відведення потоку продуктів згоряння від стін (Рисунок 2). Внаслідок зміни форми робочої зони та методу розміщення пальників, газодинамічна ситуація у печі мала зазнати змін, і режим випалу вимагав налаштування. Для оцінки умов випалу у печі після переміщення пальників був проведений гідродинамічний аналіз робочої зони. Розрахунок печі був виконаний без урахування теплообміну між газами та матеріалом, що призвело до зниження точності отриманих даних, але дозволило відобразити загальну картину розподілу параметрів газового потоку та порівняти її з аналогічними дослідженнями.

Такий підхід часто використовується в гідродинамічних розрахунках шарових установок [11, 12]. При розглянутих режимних параметрах спостерігався кільцевий потік гарячих газів. У найближчій до футерування зоні температура газів досягала 1400°C, тому матеріал не прогрівався до температури дисоціації. Швидкості газів у шахті становила 0,4–0,6 м/с.

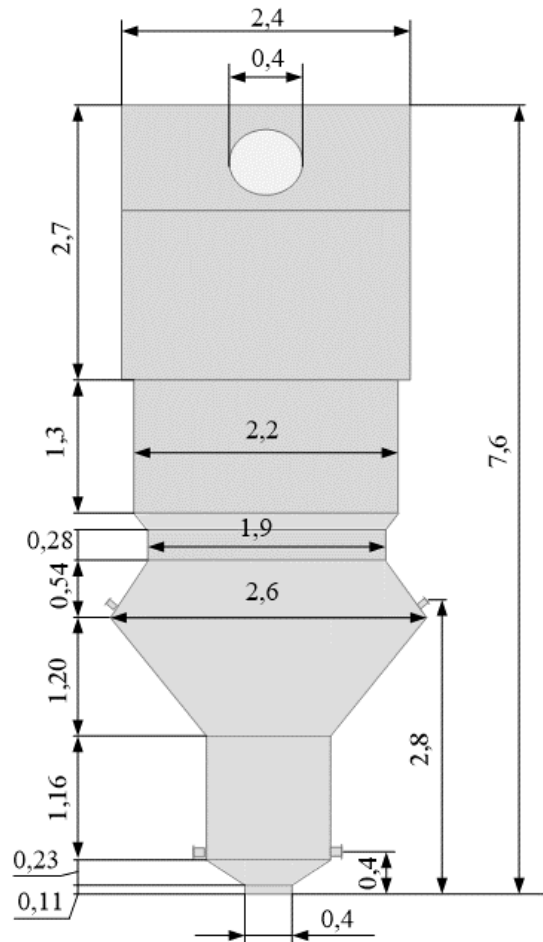


Рис. 2. Шахтна піч: геометрична схема

Футеровка печі виконана шамотною цеглою ША-19. Оскільки при температурах понад 1250°C вона активно реагує з CaO вапна, утворюючи низькотемпературні евтектики в системі CaO-Al₂O₃-SiO₂. Максимальна температура футерування не повинна перевищувати цього значення. Отримані результати показують, що після реконструкції робота печі з попередніми витратами газу та повітря не є прийнятною (Рисунок 3).

Внаслідок оптимізації виявлено, що найкращі умови для виробництва вапна зі ступенем випалу 80% досягаються при використанні печі з підвищеною витратою повітря на горіння. Це призводить до зниження температури газів до 1200°C та температури матеріалу до 1150°C, та малої витрати повітря на охолодження, що збільшує температуру вапна до 447°C. Висота зони підігріву становить близько 1,3 м, хоча активна фаза випалу починається на висоті трохи більше 1 м вище за рівень пальникових пристроїв.

Повторний гідродинамічний розрахунок печі здійснений за оптимізованими режимними пара-

метрами. Виявлено, що при роботі з попередніми витратами газу та повітря, осьова частина зони випалу заповнюється холодним повітрям, що входить з зони охолодження, і тим самим погіршує умови роботи. У пристінній зоні температури газового потоку перевищують допустимі, що може призводити до перепалу матеріалу та розплавлення футерування.

Різке зміння концентрації метану і кисню у зоні випалу свідчить про те, що горіння газу

відбувається дифузійно. У фронті горіння розвиваються високі температури. Дифузійне горіння особливо небезпечно в областях, де спостерігається нестача повітря, та горіння протікає при $\alpha = 0,5-1$. В печах з периферійними дифузійними пальниками ця область виникає біля стін, а в печах з центральним пальником – уздовж центральної вісі. У таких зонах температури можуть перевищувати 1500°C , що призводить до перепалу вапна і втрати його активності.

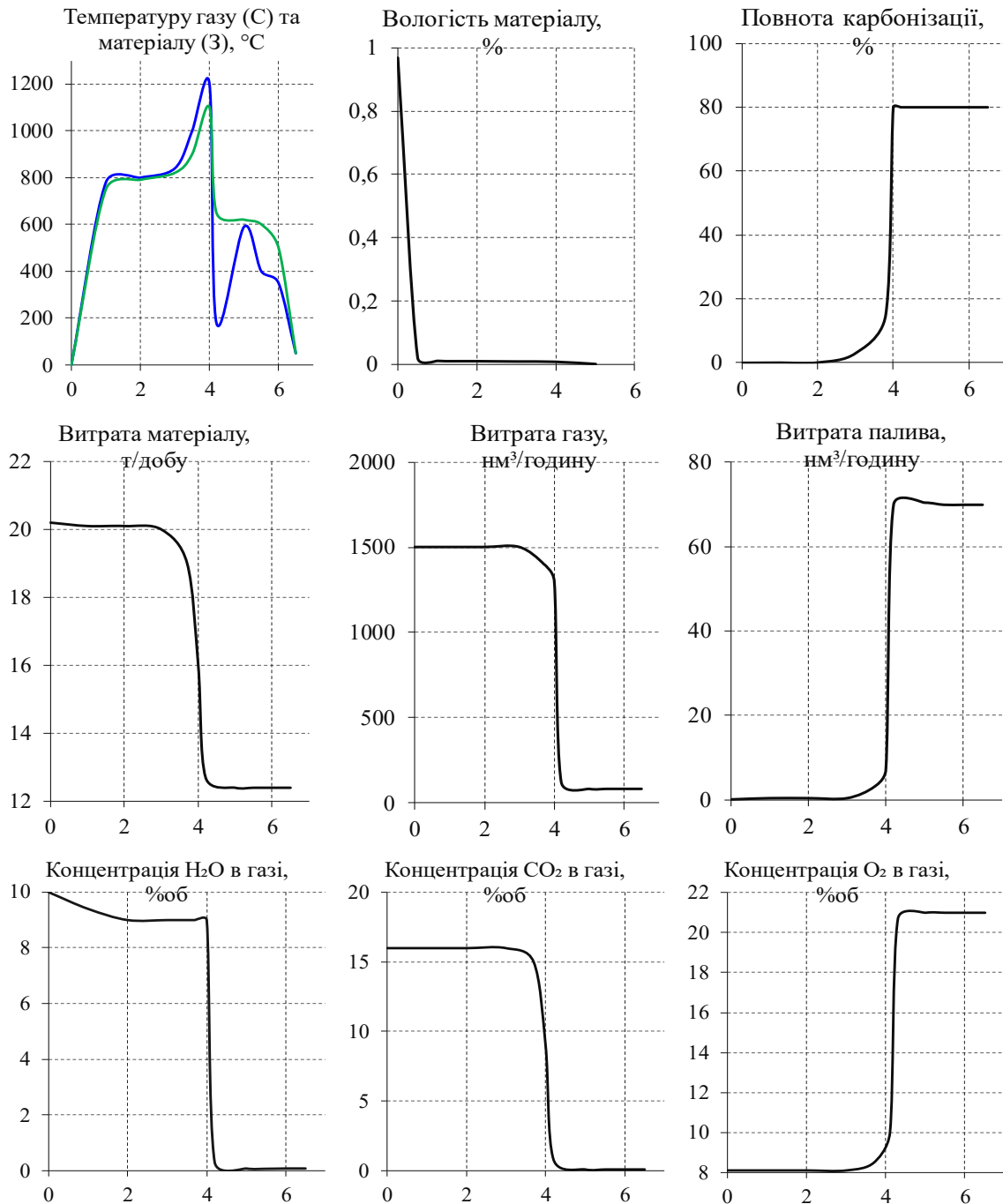


Рис. 3. Розподіл ключових параметрів по висоті шахтної печі

У розглянутій печі дифузійне горіння відбувається лише у центральній частині, оскільки продукти згоряння, що рухаються вздовж стін, утворюються в результаті кінетичного горіння попередньо отриманої паливно-повітряної суміші на пальниках. Продукти згоряння у печі розбавлені повітрям, тому реалізуються температури лише до 1200°C.

З цього випливає, що отримання вапна, яке швидко піддається гасінню, при температурах випалу 1000–1100°C може бути найбільш ефективно реалізовано у шахтній печі з пальниковими пристроями попереднього змішування при високих концентраціях баластового газу (надлишок повітря або рециркуляція).

Дослідження процесу руху матеріалу у шахтній печі. Для створення моделі руху гранульованого матеріалу у шахтній печі та його випуску через отвори було використано математичний опис, який був представлений у дослідженні [12]. Реалізація програми здійснена за допомогою середовища Matlab. Чисельні обчислення руху матеріалу можуть бути проведені для печей циліндричної форми, де геометрія шахти розглядається як плоска вісесиметрична. Програма дозволяє налаштовувати різні конфігурації внутрішнього простору. Вивантаження отворів розташовано на однаковій відстані від центру і має однакові розміри. Передбачено можливість візуалізації поля швидкостей матеріалу та отримання чисельних значень швидкостей шихти у вибраних точках внутрішнього простору шахтної печі.

Для ідентифікації моделі руху гранульованого середовища, з використанням припущення про наявність еліпсоїдів рівних швидкостей, було проведено порівняння модельних обчислень з результатами фізичного експерименту [13].

Вихідні умови: насипна вага матеріалу, 1300 кг/м³; діаметр частинок, 10 мм; коефіцієнт внутрішнього тертя 0,9; витрата матеріалу, 1,3 кг/с; діаметр випускних отворів, 50 мм; радіус кола центрів отворів, 155 мм; кількість отворів, 1000 од.; тривалість моделювання, 70 с.

Для забезпечення імітації єдиного розвантажувального отвору у формі кільця за рахунок взаємного перекриття невеликої кількості отворів, їх кількість було встановлено на рівні 1000. Результат експерименту представлено на Рисунок 4.

Для вивчення закономірностей руху матеріалу в традиційних шахтних печах була проведена серія експериментів. Особлива увага приділялася умовам вивантаження матеріалу. Експерименти включали три випадки розвантаження: виванта-

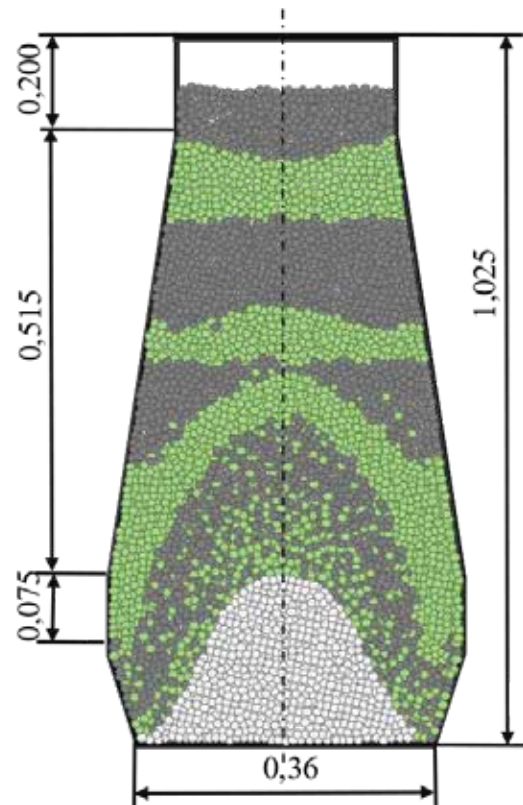


Рис. 4. Рух матеріалу в печі

ження через єдиний центральний отвір діаметром 500 мм; використання розвантажувального столу (розвантаження по всьому перерізу); вивантаження через отвори (4 шт.), діаметром 500 мм, з радіусом кола центрів отворів 800 мм.

Швидкість матеріалу була виміряна в зоні охолодження на відстані 1,5 м, в зоні випалу на відстані 7 м та в зоні підігріву на відстані 17 м. Результати розрахунків наведені на Рисунок 5.

При центральному вивантаженні матеріалу спостерігається помітна нерівномірність у його русі. У зоні охолодження різниця у часі перебування становить понад 50%, що означає, що деяка частина матеріалу залишається недостатньо охолодженою. У зоні випалу нерівномірність перевищує 6%, що негативно впливає на повноту та рівномірність випалу вапняку. Найбільш рівномірне розвантаження забезпечує система конструкції Антонова, яка має стіл вивантаження, що горизонтально зміщується, знижуючи відмінність часів перебування матеріалу в зоні випалу до близько 3%.

Альтернативною може бути система вивантаження через кілька отворів, яка дає подібний результат. Однак вплив геометрії проявляється так, що зростання швидкості руху засипки в зоні охолодження відбувається на відстані, яка дорів-

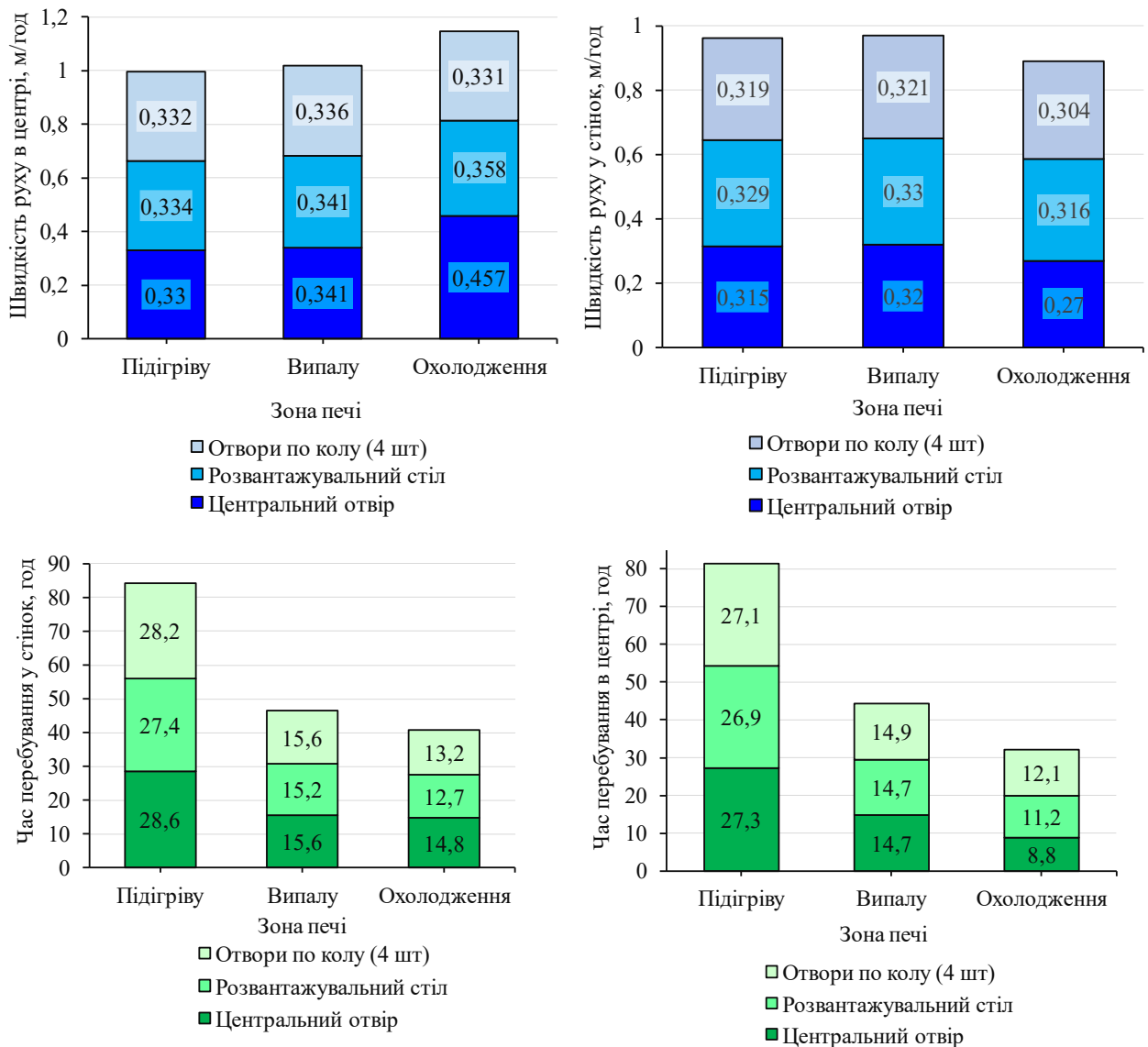


Рис. 5. Порівняння швидкостей руху матеріалу у шахтній печі

ное радіусу центрів вивантажувальних отворів, де еліпсоїди рівних швидкостей зменшуються в розмірах.

Висновки. Проведені результати досліджень свідчать про те, що головним позитивним наслідком реконструкції стало зниження витрат палива в 2,1–2,3 рази і підвищення сумарного вмісту CaO і MgO в вапні в середньому на 7%. Важливим висновком з розглянутих результатів є той факт, що, незважаючи на відмінності у часі перебування матеріалу в зонах підігріву та випалу, що впливає на рівномірність дисоціації сировини, відмінності у фактичних швидкостях руху менш значущі. Тобто радіальне перемішування матеріалу в печі з прямим профілем футерування є незначним. Максимально допустима

температура для випалу шматкового вапняку, яка забезпечує необхідний час гасіння, може бути визначена за допомогою аналізу реакційної здатності вапна при різних температурах: 900, 1000 та 1300°C. Зазвичай для виготовлення вапна температура в печі не перевищує 1000–1100°C, але для випалення окремих видів вапняку допускається використання температур понад 1300°C. Одним з потенційних напрямків вдосконалення шахтних печей із прямим профілем футерування є перехід на принцип теплообміну за проточно-протитечійною схемою та організація нижнього контуру рециркуляції продуктів згоряння з подальшим їхнім спалюванням у суміші з паливом та повітрям. Це може призвести до збільшення продуктивності реконструйованої печі на 15–20%.

Список літератури:

1. Карзун Е.Г. Боглаєнко Д.В., та ін. Дослідження процесу змочування вапна водою перед подачею її в гідратор у виробництві високодисперсного гідроксиду кальцію або пушонки. *Східноєвроп. журнал переведених технологій*, 2007. № 1/3 25. С. 41–46.
2. Шахин І.Х., Шапорєв В.П., та ін. Аналіз способів виробництва вапна та випалу карбонатної сировини. *Вісник НТУ «ХПІ»*, 2003. № 3. С. 76–90.
3. Piringer H. Lime shaft kilns. *Energy Proc.*, 2017. 120. pp. 75–95. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.07.156>
4. Senegačnik A., Oman J., Širok B. Annular shaft kiln for lime burning with kiln gas recirculation. *Appl Therm Eng.*, 2008. № 28 (7) pp. 785–792. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2007.04.015>
5. Дорофеєнко С. О. Чисельне моделювання руху сипучого матеріалу в реакторі шахтного типу. *Теоретичні основи технологій*, 2007. Т. 41. № 2. С. 205–212.
6. Дорофеєнко С. О. Чисельне моделювання перебігу бі дисперсного сипучого матеріалу в реакторі шахтного типу. *Теоретичні основи хімічної технології*, 2007. Т. 41. № 6. С. 625–629.
7. Шапорєв П. В., Райко В.Ф., Себко В.В. Про можливість збагачення вапняків класу 40–150 мм із використанням фотоелектронного сепаратора. *Вісник НТУ «ХПІ»*, 2010. № 16. С. 139–153.
8. Rehabilitation and adaptation of disused or obsolete lime kilns // Intermediate Technology conference. – Myson House, 2002.
9. Ritchie I. M., The kinetics of lime slaking. *Hydrometallurgy*, 1990. № 23. P. 377–396.
10. DIN/EN 459-2: 2002 Building lime – Part 2: Test methods EURO116.20. 21 p.
11. Гордон Я.М. Дослідження впливу параметрів фурменого пристрою на розподіл у щільному шарі. *Вісник ВУЗів*, 2012. Чорна металургія. 1977. № 2. С. 135–139.
12. Гордон Я.М. Механіка руху матеріалів та газів у шахтних печах. Наука. Алма-Ата, 1989. – 144 с.
13. Zhou Z.Y. Discrete particle simulation of gas-solid flow in a blast furnace. Third International Conference on CFD in the Minerals and Process Industries (CSIRO). – Melbourne, 2003. – P. 455–460.
14. Krause B., Liedmann B., Wiese J., Buchera P., Wirtz S., Piringer H., Scherer V. 3D-DEM-CFD simulation of heat and mass transfer, gas combustion and calcination in an intermittent operating lime shaft kiln. *International Journal of Thermal Sciences*, 2017. 117. P. 121–135. <https://doi.org/10.1016/j.ijthermalsci.2017.03.017>
15. Manocha S., Ponchon F. Management of lime in steel. *Metals*, 2018. 8. P. 686. <https://doi.org/10.3390/met8090686>
16. Piringer H. Key factors to minimise emissions from parallel flow regenerative lime kilns. Technical Report 11, ZKG International, 2015.
17. Piringer H. Lime shaft kilns. *Energy Procedia*, 2017. 120. P.75–95. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.07.156>

Vytiahanets V.S., Pitak I.V. OPTIMIZATION OF THE OPERATING MODE AND DESIGN OF THE MINE FURNACE FOR LIME PRODUCTION

The metallurgical production of lime, although it plays a key role in the construction sector and other sectors of the economy, is an extraordinarily energy-intensive and labour-intensive process. A significant problem is the large CO₂ emission during calcination, which accounts for half of the total CO₂ emissions in the ore. Closing carbonization plants is becoming an urgent task for environmental policy. The main goal of lime production is to ensure high product quality and constant improvement of working conditions to reduce the negative impact on the environment. However, the main cost factor is the energy required to calcine limestone, which makes managing this process extremely important, especially with the constant increase in energy costs. The article considers various aspects of optimizing mine kilns' operating mode and design for lime production. Technological and engineering aspects such as the choice of kiln type, optimization of the limestone firing process and the effect of kiln design on the quality and quantity of lime produced are investigated. The main goal is to ensure the maximum yield of products with minimum consumption of raw materials and energy and reduce the environmental impact. Research findings show that the reconstruction of mine furnaces can significantly reduce fuel consumption and increase the content of useful components in lime. Effective management of the limestone firing process can ensure stable results even under different kiln operating conditions. Optimizing the temperature regime and using the principle of direct-counter-current heat exchange can significantly improve performance and reduce the environmental impact. It was found that one of the potential ways to improve mine furnaces with a direct linking profile is to switch to the principle of heat exchange in a direct-counterflow scheme and create a lower circuit for recirculation of combustion products, which are then burned in a mixture with fuel and air. This initiative can potentially increase productivity by 15–20% after furnace reconstruction.

Key words: lime, industrial growth, roasting, process kinetics, granulation, mathematical model, cooling, adsorption, gaseous emissions.

Глуховський В.В.

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

Глуховський І.В.

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

УДАРОМІЦНІ ДИСПЕРСНО-АРМОВАНІ КОМПОЗИТИ НА ОСНОВІ НЕОРГАНІЧНИХ В'ЯЖУЧИХ ТА МІНЕРАЛЬНИХ ВОЛОКОН

У статті представлені результати дослідження міцності при ударному навантаженні дисперсно-армованих композиційних матеріалів на основі неорганічних в'язучих та мінеральних волокон.

Стан зберігання та видалення відходів в Україні, згідно зі статистичними даними, залишається критичним, що, насамперед, обумовлено відсутністю належної інфраструктури щодо здійснення зазначених операцій поводження з відходами та відповідного фінансування. Через низький рівень використання відходів переважна більшість їх продовжує накопичуватися на територіях підприємств.

У даних економічних умовах України широке застосування сучасних технологій ліквідації й утилізації високотоксичних відходів малоімовірно. У зв'язку з цим основний шлях їх ізоляції від біосфери – це напрямок зберігання у системно обладнані приповерхні сховища.

Розвиток технологій поводження з екологічно-небезпечними та токсичними відходами передбачає реалізацію наступних цілей: – створення парку транспортно-захисних контейнерів, які забезпечують можливість контейнеризації небезпечних речовин в місцях їхнього теперішнього зберігання; – організацію безпечного транспортування небезпечних речовин; – організацію довгострокового безпечного їхнього зберігання на територіях спеціально облаштованих полігонів.

Використання у якості основного конструкційного матеріалу бетону на основі портландцементу забезпечує необхідний рівень економічної ефективності. Але низькі властивості бетонів при сприйнятті ударних та динамічних навантажень обумовлює необхідність додаткового дисперсного армування.

У якості армуючих компонентів удароміцних композицій були обрані скляні волокна алюмоборосилікатного складу (товщиною 10...12 мкм) та лугостійкого складу (товщиною 12...15 мкм), а також скляні базальтові стрижні товщиною до 1 мм.

У якості моделі для визначення напруг, які виникають у конструкційних елементах контейнера при ударних навантаженнях, обраний транспортно-захисний контейнер КТЗ-3,2 для твердих радіоактивних відходів та методика випробування контейнера в аварійних умовах експлуатації.

Ключові слова: дисперсно-армовані композити, скляне волокно, скляні базальтові стрижні, питома робота руйнування, міцність при ударному навантаженні, транспортно-захисний контейнер.

Постановка проблеми. Аналіз технічних вимог, що висуваються до залізобетонних транспортно-захисних контейнерів для радіоактивних відходів, показує, що найскладнішим видом випробувань цього виду виробів є випробування контейнера на вільне падіння [1, 2].

Традиційно виробли із залізобетону не призначені для сприйняття ударних та динамічних навантажень, що зумовило необхідність створення залізобетонних виробів з комбінованим армуванням, у яких до складу бетону вводиться дисперсний армуючий компонент з метою збільшення ударної (динамічної) міцності та тріщиностійкості.

Властивості дисперсно-армованих композитів на основі неорганічних в'язучих та тонких мінеральних волокон або склоцементних композиційних матеріалів залежать від складу компонентів, марки цементу, водоцементного відношення, щільності цементної матриці, виду та складу волокна, їхньої орієнтації і рівномірності розподілу в об'ємі, технологій виробництва та умов експлуатації виробів.

Композиції на основі портландцементу і скляного волокна через один рік після виготовлення характеризуються міцністю при розтягненні в межах 9–65 МПа при об'ємному змісті волокна

до 10%. Зі збільшенням кількості волокна до 20% міцність при розтяганні може досягати 123 МПа. Склоцементні матеріали характеризуються також високим опором ударним навантаженням, що є наслідком високої тріщиностійкості і наявністю в'язкого характеру руйнування при усіх видах напруженого стану.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Бетон, який представляє собою гетерогенний матеріал, характеризується наявністю таких структурних параметрів як технологічні тріщини та залишкові деформації, які виникають у період отримання самого матеріалу при формуванні та подальшому твердненні. У зв'язку з чим, основною причиною руйнування таких матеріалів під дією удару є незворотне зростання технологічних тріщин до тріщин руйнування або магістральних. У зв'язку з чим, вирішення проблеми підвищення ударної стійкості бетонів з урахуванням несприятливого впливу навколишнього середовища є виправданим та практично необхідним [3].

Дисперсне армування зменшує розмір об'ємних деформацій склобетону в початковий період твердіння, причому його вплив тим більше, чим вище концентрація волокна в цементній матриці. Дослідження склобетону, що характеризується витратою цементу 433 кг/м³, В/Ц = 0,57 і часткою піску в суміші заповнювачів 0,6, встановлено, що з уведенням скловолокна в кількості 0,25; 0,5; 0,75 і 1% його деформації зсідання знижується відповідно на 14; 36; 50 і 64%.

Результати дослідження особливостей утворення і розвитку тріщин у склобетоні показали, що незалежно від об'ємного змісту волокна у вивчених межах (1,2–2,8%) перші тріщини шириною 3–5 мкм утворюються при значенні відносної деформації, рівній $25\text{--}30 \cdot 10^{-5}$, а максимальне значення ширини розкриття тріщини складає 30–50 мкм [4, 5].

Постановка завдання. Метою статті є дослідження з встановлення залежності ударної міцності композицій на основі неорганічних в'язучих і мінеральних волокон від їхнього якісного і кількісного складу і умов твердіння та встановлення можливості використання цих композицій для виготовлення транспортно-захисних контейнерів.

Виклад основного матеріалу. В якості об'єктів дослідження були використані композиції на основі портландцементу та мінеральних волокон двох видів. У першому випадку були використані традиційні скляні волокна алюмоборосилікатного складу (товщиною 10...12 мкм) та лугостійкого складу (товщиною 12...15 мкм) які

відрізняються високим початковим рівнем міцності. У другому випадку були використані скляні базальтові стрижні товщиною до 1 мм, початковий рівень міцності яких відповідає рівню міцності масивного скла.

У разі використання скляних волокон міцність композицій на їх основі зменшується на початковому етапі твердіння, що є наслідком інтенсивної хімічної взаємодії агресивних новоутворень в'язучого з поверхнею армуючого компонента [4, 5].

У разі використання потовщених скляних базальтових стрижнів, міцність яких практично не змінюється зі збільшенням кількості дефектів на їх поверхні, міцність композицій на їх основі зростає зі зростанням інтенсивності процесів взаємодії в зоні контакту матриці та армуючого компонента, що, за певних умов, дозволяє отримувати композиції з кінцевим рівнем межі міцності при згині 60–70 МПа [6].

Міцність досліджуваних композицій при ударних (динамічних) навантаженнях визначалася відповідно до методики [7] на копрі У-1А і розраховувалася за величиною питомої роботи руйнування бетону (A) на підставі залежності, що визначає взаємозв'язок потенційної енергії деформацій (U_d) та міцності матеріалу при динамічних навантаженнях (R_d), встановлених для випадку вільного падіння стрижня з площею поперечного перерізу F і довжиною L на жорстку плиту: $R_d = (6 \cdot A \cdot E_0)^{1/2}$.

Аналіз результатів дослідження ударної міцності композицій (табл. 1) показує, що при твердінні композицій на основі цементного каменю в нормальних умовах протягом 28 діб використання армуючого компонента у вигляді скловолокна алюмоборосилікатного складу призводить до збільшення питомої роботи руйнування (далі ПРР) композиції у 2,3; 4,0; 5,7; 8,7 та 9,7 рази при відсотку армування 0,5; 1; 2; 3 та 4% відповідно.

Композиції, виготовлені з використанням у якості армуючого компоненту скловолокна лугостійкого складу, характеризуються максимальним значенням ПРР – 36400 кДж/м³, що є наслідком підвищеної стійкості даних волокон у твердіючому цементі. У цьому разі, перевищення ПРР проти аналогічною характеристикою неармованого каменю становить 21,7 разів, що є максимальним показником для досліджуваного у роботі діапазону.

Використання у якості армуючого компоненту скляних базальтових стрижнів призводить до підвищення ПРР композицій в 2,3–4,5 рази в порівнянні з неармованим цементним каменем. При

Питома робота руйнування та міцність при ударному (динамічному) навантаженні досліджуваних композицій на основі цементного каменю

Армуючий компонент	%, армування	Питома робота руйнування, кДж/м ³ , після		Міцність композиції при ударному навантаженні, МПа, після	
		тверднення у нормальних умовах 28 діб	пропарювання при 95°C 8 годин	тверднення у нормальних умовах 28 діб	пропарювання при 95°C 8 годин
Композиції на основі цементного каменю					
Відсутній	0	1680	1680	567,9	567,9
Скловолокно алюмоборосилікатного складу	0,5	3920	1680	867,5	567,9
	1	6720	2240	1135,9	655,8
	2	9520	2800	1351,9	733,2
	3	14560	3360	1672,0	803,2
	4	16200	3920	1703,8	867,5
Скловолокно лугостійкого складу	3	36400	5040	2643,6	983,7
Скляні базальтові стрижні	1	3920	5200	867,6	999,2
	3	5880	6720	1062,5	1135,9
	5	7560	8680	1204,9	1291,0

цьому збільшення ПРР, як і у разі використання волокон алюмоборосилікатного складу, пропорційно кількості армуючого компонента в досліджуваних композиціях.

Пропарювання досліджуваних композицій призводить до зниження величини ПРР композицій, армованих скловолокном алюмоборосилікатного та лугостійкого складів. Так, у композицій, армованих 3% алюмоборосилікатного скла ПРР знижується з 14560 кДж/м³ при нормальному твердненні до 3360 кДж/м³ після пропарювання. Аналогічно, значення ПРР для композицій на основі лугостійкого скла знижується з 36400 кДж/м³ при нормальному твердненні до 5040 кДж/м³ після пропарювання. Таке зниження є наслідком збільшення швидкості корозії тонких скляних волокон у середовищі цементу, що твердіє при підвищених температурах.

У той же час, незважаючи на прискорення корозійних процесів армуючого компонента при пропарюванні, кінцевий рівень ПРР після пропарювання у армованих волокном композицій залишається вищим за аналогічний показник цементного каменю. Так, значення ПРР композицій, армованих 1, 2, 3 і 4% алюмоборосилікатного волокна в 1,3–2,3 рази вищий ніж у цементного неармованого каменю. І лише при введення до складу композиції 0,5% волокон значення ПРР залишається рівним аналогічному показнику цементного каменю. Питома робота руйнування пропарених композицій, виготовлених із використанням лугостійких волокон, перевищує величину ПРР цементного каменю в 3 рази.

Порівняння значень питомої роботи руйнування у випадку використання у якості армуючого компонента скляних базальтових стрижнів діаметром до 1 мм показує, що пропарювання призводить до зростання досліджуваного показника. Так, при 1% армування значення ПРР пропарених композицій перевищує аналогічний показник для композицій, що тверділи у нормальних умовах у 1,3 рази. Відповідно, для композицій, армованих 3 та 5% базальтових стрижнів це перевищення становить 1,2 рази.

Підвищення питомої роботи руйнування після пропарювання під час використання базальтових стрижнів є наслідком двох причин.

Перша причина – відсутність залежності міцності масивного скла від стану поверхні, що на відміну від тонких скляних волокон забезпечує незмінність їх фізико-механічних характеристик у лужному середовищі твердіючого цементу. Другою причиною зростання ПРР при використанні базальтових стрижнів є зміцнення зони контакту армуючого компонента і матриці в результаті збільшення інтенсивності хімічної взаємодії поверхні скла з новоутвореннями в'язучого при підвищених температурах [8, 9, 10].

Введення до складу цементного каменю дрібного заповнювача призводить до збільшення ПРР матеріалу матриці як у разі твердіння у нормальних умовах, так і при пропарюванні. Таке збільшення є наслідком зниження усадкових деформацій цементного каменю при введенні до його складу інертних заповнювачів (табл. 2).

У разі твердіння композицій на основі цементно-піщаного розчину в нормальних умовах описані вище залежності росту ПРР зі збільшенням відсотка армування зберігаються як при використанні скляних волокон алюмоборосилікатного та лугостійкого складу, так і при використанні базальтових стрижнів.

При цьому ПРР армованих композицій на основі алюмоборосилікатного волокна вищий за аналогічний показник неармованого матеріалу матриці в 3,8 рази при максимальному відсотку армування (4%). Введення до складу композиції лугостійкого волокна дозволяє підвищити ПРР у 5,0 разів. Введення 5% базальтових стрижнів супроводжується зростанням ПРР у 8,1 разів.

Пропарювання композицій на основі цементно-піщаного розчину призводить до зниження ПРР у всіх зразків, армованих скляними волокнами та базальтовими стрижнями. Причому в композиціях на основі волокон алюмоборосилікатного складу з відсотком армування від 0,5 до 2% значення досліджуваного показника дорівнює значенню ПРР неармованого матеріалу матриці. При цьому зберігається перевищення значень ПРР у композицій, армованих лугостійким волокном порівняно з матеріалом матриці в 2,4 рази та у композицій армованих базальтовими стрижнями в 2,3–3,8 рази.

Узагальнюючи отримані результати, можна зробити висновок, що введення до складу цементного каменю і цементно-піщаного розчину дисперсного армуючого компонента в більшості роз-

глянутих випадків сприяє збільшенню питомої роботи руйнування композицій.

Максимального ефекту при твердінні композицій у нормальних умовах вдається досягти при армуванні цементного каменю лугостійким волокном у кількості 3% та при армуванні цементно-піщаного розчину базальтовими стрижнями у кількості 5%. У цих випадках вдається підвищити значення питомої роботи руйнування композицій порівняно з неармованим матеріалом матриці у 21,7 та у 8,1 рази відповідно.

У разі пропарювання композиції максимального ефекту вдається досягти при використанні у якості армуючого компонента базальтових стрижнів. У цьому разі збільшення питомої роботи руйнування композиції проти аналогічного показника матеріалу матриці відбувається у 3,8–5,1 разів.

Для визначення максимального значення напруги при вільному падінні контейнера на мішень (випробування згідно ПБПРМ-2020) було обрано транспортно – захисний контейнер КТЗ-3,2 (рис. 1) [11]. Розрахункова схема визначення напруги уздовж грані контейнера і уздовж площини основи наведена на рисунку 2.

За результатами розрахунків встановлено, що максимальна значення напруги яка виникає у тілі залізобетонного транспортно-захисного контейнера при його вільному падінні на мішень становить 1095,0 МПа.

Аналіз значень міцності досліджуваних композицій при ударному (динамічному) навантаженні показує, що необхідним рівнем динаміч-

Таблиця 2

Питома робота руйнування та міцність при ударному (динамічному) навантаженні досліджуваних композицій на основі цементно-піщаного розчину

Армуючий компонент	% армування	Питома робота руйнування, кДж/м ³ , після		Міцність композицій при ударному навантаженні, МПа, після	
		тверднення у нормальних умовах 28 діб	пропарювання при 95°C 8 годин	тверднення у нормальних умовах 28 діб	пропарювання при 95°C 8 годин
Композиції на основі цементно-піщаного розчину					
Відсутній	0	2800	2800	733,2	733,2
Скловолокно алюмоборосилікатного складу	0,5	3360	2800	803,2	733,2
	1	3920	2800	867,5	733,2
	2	4360	2800	803,2	733,2
	3	6720	3360	1135,9	803,2
	4	10640	3920	1429,3	867,5
Скловолокно лугостійкого складу	3	14000	6720	1639,5	1135,9
Скляні базальтові стрижні	1	7560	6440	1204,8	1112,0
	3	11480	7840	1484,6	1226,9
	5	22680	10640	2086,7	1429,3

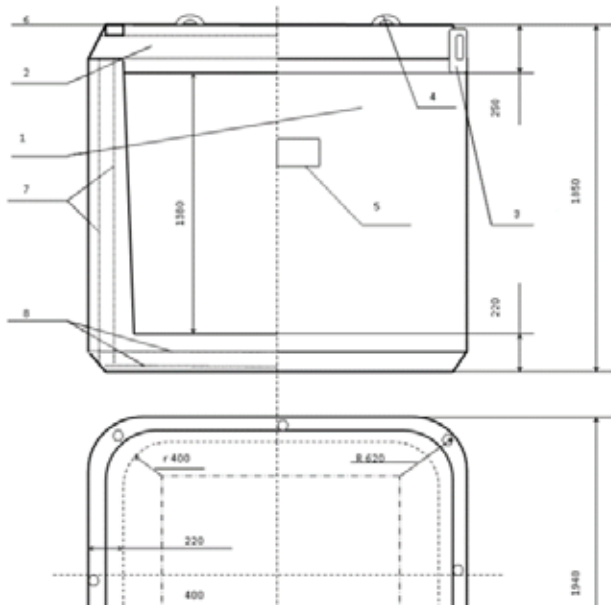


Рис. 1. Транспортно-захисний контейнер КТЗ-3,2 [11]

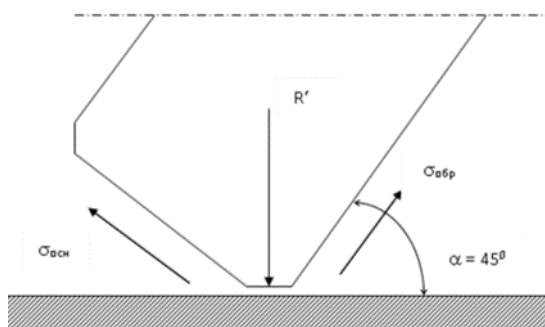


Рис. 2. Розрахункова схема визначення напруги уздовж грані контейнера і уздовж площини основи при вільному падінні на кут

ної міцності, вище 1100 МПа, характеризуються композиції, що тверділи у нормальних умовах, на основі цементного каменю і скляного волокна алюмоборосилікатного складу в кількості від 1 до 4% (1135,9–1703,8 МПа), композиції на основі цементного каменю, армовані скляним волокном лугостійкого складу (2643,6 МПа) та композиції, армовані базальтовими стрижнями у кількості 5% (1204,9 МПа).

Пропарювання композицій на основі цементного каменю призводить до зниження значення міцності при ударному (динамічному) навантаженні нижче за необхідний розрахунковий рівень при їх армуванні скляним волокном алюмоборосилікатного складу (655,8–867,5 МПа) і лугостійкого складу (983,7 МПа). Рівень міцності при

ударному (динамічному) навантаженні після пропарювання композицій, армованих базальтовими стрижнями у кількості 3 і 5% становить 1135,9 і 1291,0 МПа, відповідно, що перевищує розрахункове значення напруги, що виникає при вільному падінні контейнера.

З композицій на основі цементно-піщаного розчину які тверділи у нормальних умовах на протязі 28 діб достатнім рівнем міцності при ударному (динамічному) навантаженні характеризуються композиції, армовані 3 і 4% скляним волокном алюмоборосилікатного складу у кількості 3 і 4% (1135,9 і 1429,3 МПа), скляним волокном лугостійкого складу (1639,5 МПа) та базальтовими стрижнями у кількості від 1 до 5% (1204,8–2086,7 МПа).

Пропарювання композицій на основі цементно-піщаного розчину призводить до зниження рівня міцності при ударному (динамічному) навантаженні нижче за необхідний розрахунковий рівень у композицій, армованих скляним волокном алюмоборосилікатного складу (803,2–867,5 МПа). У композицій, армованих скляним волокном лугостійкого складу та базальтовими стрижнями кінцевий рівень міцності при ударному (динамічному) навантаженні залишається вищим за необхідне розрахункове значення і становить 1135,9 та 1112,0–1429,3 МПа відповідно.

Висновки.

1. З наведених композицій найбільш придатними для використання у виробництві транспортно-захисних контейнерів для екологічно-небезпечних та радіоактивних відходів є композиції на основі цементно-піщаного розчину.

2. Необхідність інтенсифікації процесів твердіння при виробництві контейнерів з метою скорочення металоемності виробництва та тривалості технологічного циклу зумовлює необхідність вибору композицій, які після пропарювання забезпечують необхідний рівень міцності при ударному (динамічному) навантаженні.

3. У якості дисперсно-армованих композитів на основі неорганічних в'язучих та мінеральних волокон для виробництва транспортно-захисних контейнерів можуть бути рекомендовані композиції на основі цементно-піщаного розчину, армовані лугостійким скловолокном у кількості 3% та базальтовими стрижнями діаметром до 1 мм у кількості від 1 до 3%.

Список літератури:

- 1 НП 306.6.229-2020 Правила безпечного перевезення радіоактивних матеріалів (ПБІРМ-2020). URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z1313-20#Text> (да звернення: 20.02.2024).
- 2 Сербін В.П., Глуховський В.В., Сорокін В.Т. Захоронення радіоактивних відходів. Київ: УкрНТІ, 1993. 36 с.
3. Вировий В.Н., Дорофєєв В.С., Фіц С.Б. Бетон в умовах ударної дії. Монографія. Одеса: Внешреклам-сервіс, 2004. 270 с.
4. Bentur, A., Mindess. S. Fiber Reinforced Cementitious Composites, Second Edition, Taylor and Francis Group, London and New York, 2007. 594 p.
5. Majumdar A.I., West J.M. Larner L.J. Properties of glass fibres in cement environment. J. Mater. Sci. 1977. № 5. P. 927-936.
6. Глуховський В.В., Михайлішина Н.З., Залежність міцності склоцементних композицій від гідролітичного класу склоарматури. Доповіді Перших наукових читань імені Академіка НАН України А.С. Бережного “Фізико-хімічні проблеми матеріалознавства”. Харків: 2001. С. 50-51.
7. Опір матеріалів: Підручник Г.С. Писаренко, О.Л. Квітка, Е.С. Уманський / за ред. Г.С. Писаренко. 2-ге вид., допов. і переробл. К.: Вища шк., 2004. 655 с.
8. Glukhovskiy V.V., Mikhailisina N.Z., Serbin V.P. High-strength and durable composites with non-metallic reinforcement. 9th International congress on the chemistry of cement. New Delhi, India: 1992. Vol. V. p. 475-478.
9. Glukhovskiy V.V., Biryukovich Y.L., Mikhailisina N.Z., Dashkova T.S. Peculiar features of contact zone formation between cement paste and vitreous silicate filler. 10th International congress on the chemistry of cement. Gothenburg, Sweden: 1997. Vol. 4. 4 pp.
10. Glukhovskiy V.V., Biryukovich Y.L., Mikhailisina N.Z., Dashkova T.S. Durability of glass fiber reinforced concrete. 13. International Baustofftagung. Weimar: 1997. P. 2-0287–2-0295.
11. Контейнер транспортно-захисний для твердих радіоактивних відходів: патент 59479 Україна: МПК7 G 21F5/005. № 2001064284; заявл. 20.06.2001; опубл. 15.09.2003, Бюл. № 9. 5 с.

Glukhovskiy V.V., Glukhovskiy I.V. IMPACT-RESISTANT DISPERSION-REINFORCED COMPOSITES BASED ON INORGANIC BINDERS AND MINERAL FIBERS

The article presents the results of the study of the impact strength of dispersed-reinforced composite materials based on inorganic binders and mineral fibers.

The state of waste storage and disposal in Ukraine, according to statistical data, remains critical, which, first of all, is due to the lack of proper infrastructure for the implementation of the specified waste management operations and the corresponding financing. Due to the low level of waste utilization, the vast majority of it continues to accumulate on the territories of enterprises.

In the given economic conditions of Ukraine, the widespread use of modern technologies for liquidation and disposal of highly toxic waste is unlikely. In this regard, the main way of their isolation from the biosphere is the direction of storage in systematically equipped near-surface storage facilities.

The development of environmentally hazardous and toxic waste management technologies involves the implementation of the following goals: – creation of a fleet of transport-protective containers that provide the possibility of containerization of hazardous substances in their current storage locations; – organization of safe transportation of dangerous substances; – the organization of their long-term safe storage in the territories of specially equipped landfills.

The use of Portland cement-based concrete as the main structural material ensures the necessary level of economic efficiency. But the low properties of concrete in the perception of impact and dynamic loads determine the need for additional dispersed reinforcement.

Glass fibers of aluminoborosilicate composition (thickness 10...12 μm) and alkali-resistant composition (thickness 12...15 μm), as well as glass basalt rods up to 1 mm thick, were chosen as reinforcing components of impact-resistant compositions.

As a model for determining the stresses that arise in the structural elements of the container under shock loads, the KT3-3.2 transport-protective container for solid radioactive waste and the method of testing the container in emergency operating conditions were chosen.

Key words: dispersion-reinforced composites, glass fiber, glass rods, specific work of destruction, strength under impact load, transport – protective container.

Лесік С.М.

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

Іваненко І.М.

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

КОМПОЗИТНИЙ НІКЕЛЬ-ФЕРИТОВИЙ КАТАЛІЗАТОР ГІДРОЛІЗУ БОРОГІДРИДУ НАТРІЮ

В умовах стрімкого розвитку науки і техніки значна нестача енергії є однією з ключових проблем сучасності. Традиційні енергетичні ресурси, такі як нафта, вугілля, природний газ, ядерна та гідроенергія досягли піку свого видобування. До того ж їх використання і перетворення супроводжується значними кліматичними змінами та забрудненням навколишнього середовища. Все більше країн намагаються перейти на нетрадиційні відновлювальні енергетичні джерела, але кількість ультрафіолету у сонячній енергетиці та кінетична енергія вітру у вітроенергетиці також обмежені. В цьому розрізі найбільшу увагу сучасності привертає водень, ресурс з найвищою енергетичною щільністю, перетворення якого не супроводжується шкідливими викидами. Транспортування чистого водню на великі відстані супроводжується високою вибухонебезпечністю, що є обмежуючим фактором широкого розповсюдження цієї технології. Для генерації водню запропоновано модельну гетерогенну каталітичну окисно-відновну реакцію гідролізу борогідриду натрію. Як каталізатор застосовували композитний нікелевий ферит на матриці з активного вугілля, який синтезували золь-гель методом за різних умов температурної обробки. Рентгеноструктурні дослідження синтезованих зразків підтвердили формування цільової фази кубічної сингонії нікелевого фериту та продемонстрували незначну залежність розміру кристаліту від зміни температури прожарювання, від 25 до 22 нм за температур від 400 до 600 °С, відповідно. Встановлено, що найвищу каталітичну активність проявляє каталізатор NFC1, отриманий за температури прожарювання 400 °С. Каталітична активність цього зразку описувалася показником виділення водню, який складав 800, 2080 та 2180 см³/(хв·г_{кат}) за температури реакції 60, 70 та 80 °С, відповідно. Встановлено, що підвищення температури реакції до 70 °С значно пришвидшує процес гідролізу борогідриду натрію, а подальше збільшення температури впливає менш суттєво.

Ключові слова: нікель ферит, золь-гель технологія, каталіз, гідроліз, борогідрид натрію, шпінель.

Постановка проблеми. Однією з основних проблем, з якою стикається сучасний світ є вичерпність запасів викопних ресурсів, видобування та перетворення яких, супроводжується зміною кліматичних умов та забрудненням навколишнього середовища. Постійний зростаючий розвиток сучасної електроніки та техніки, в умовах зростання кількості населення, потребує все більше електроенергії. Як видно з рис. 1, традиційні ресурси, такі як нафта, вугілля, природний газ, ядерна та гідроенергія досягли піку генерації [1]. Та лише генерація з відновлювальних джерел енергії зросла вдвічі за 5 останні роки.

Вирішення цієї проблеми потребує пошуку екологічно чистих, відновлювальних та безпечних джерел енергії. У цьому контексті велику увагу привертає водень, проста сполука утворена двома атомами Гідрогену. Водень має ряд важли-

вих переваг над іншими потенційними енергоносіями: безвідходне перетворення в чисту енергію, яка супроводжується утворенням чистої водяної пари; висока щільність енергії, яка характеризується теплотворною здатністю 120 000 000 Дж/кг; широка варіативність виділення, адже водень може бути отриманий з великої кількості різних сполук. Така велика щільність енергії супроводжується серйозними ризиками при роботі з цим газом, адже вибухонебезпечність водню ускладнює транспортування цього відновлювального носія енергії на великі відстані.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Існує декілька способів збереження та транспортування водню, основні з яких наведено в табл. 1 [2]. Стиснений до тисяч атмосфер водень є найбільш екологічним способом, але представляє високу вибухонебезпечність. Криоконсервова-

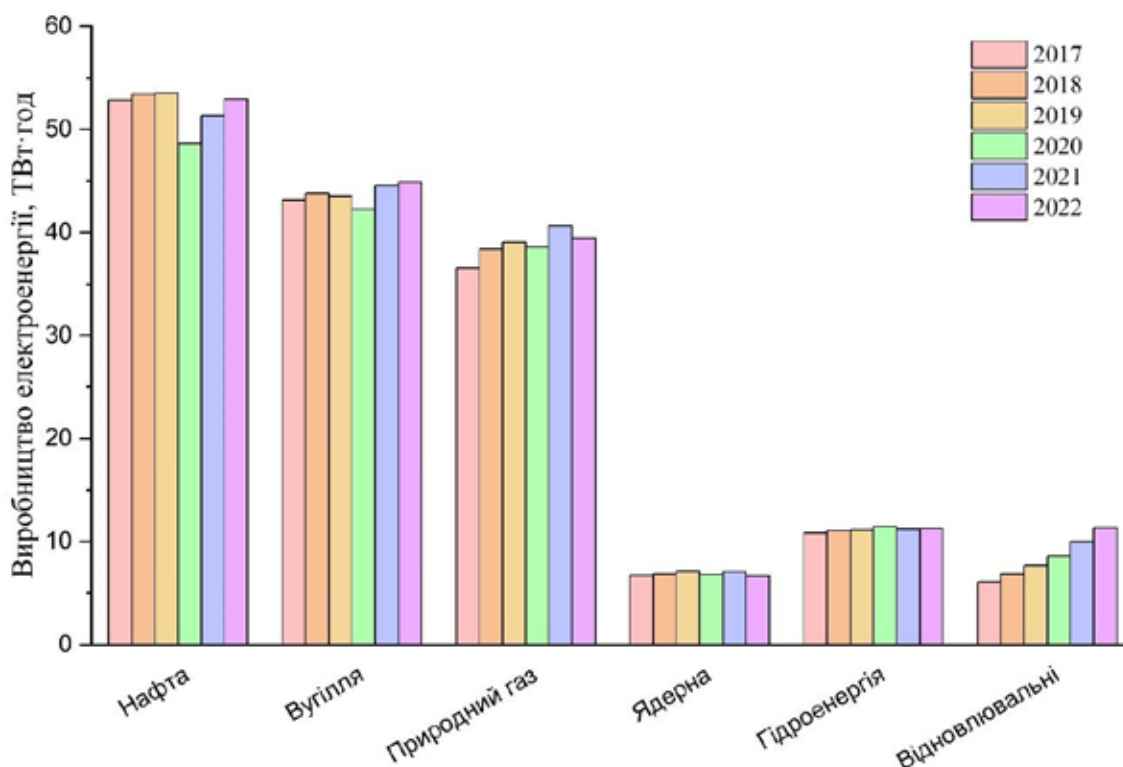


Рис. 1. Світове виробництво електроенергії з різних джерел

Таблиця 1

Методи збереження та транспортування водню [2]

Фізичні				
Стиснений H_2		Кріоконсервований H_2		Рідкий H_2
Матеріальні				
Адсорбційний (MoF_5)	Органічний ($(CH_2)_4-CH-CH_3$)	Інтерметалічні гідриди ($LaNi_5H_6$)	Комплексні гідриди ($NaAlH_4$)	Тетраборогідриди ($NaBH_4$)

ний водень більш безпечний носій енергії, але потребує значних енерговитрат для досягнення температури $-196\text{ }^\circ\text{C}$. Найбільш безпечним фізичним способом збереження та транспортування є зрідження водню, яке досягається за температур $-253\text{ }^\circ\text{C}$ та нижче і супроводжується найбільшими енергетичними втратами. Для уникнення вибухонебезпечності чистого водню розроблені матеріальні способи, які дозволяють зберігати водень у безпечних сполуках та виділяти водень у місці використання. До того ж матеріальні способи дозволяють зменшити енерговитрати та зберегти достатній рівень екологічності процесу виділення водню. Адсорбційний та органічний способи потребують використання високих температур виділення водню: $300\text{ }^\circ\text{C}$ і вище. Інтерметалічні та комплексні способи супроводжуються утворенням побічних продуктів під час виділення

водню, які економічно недоцільно відновлювати для повторного використання.

Тетраборогідридний спосіб вважається найбільш перспективним, адже дозволяє отримувати водень за технологічно низьких температур у присутності каталізаторів з неблагородних металів [3, с. 8]. Цей процес супроводжується утворенням метаборату, який легко відновлюється до вихідного борогідриду натрію для повторного використання.

Ця реакція ендотермічна, тому її швидкість підвищується з підвищенням температури (рис. 2) [4, с. 1197].

Швидкість реакції зростає з підвищенням вихідної концентрації борогідриду натрію (рис. 3) та дози каталізатора (рис. 4) [5, с. 29621]. Підвищення швидкості виділення водню в 7 разів досягається збільшенням вихідної концентрації $NaBH_4$ з 1 до 7,5 %.

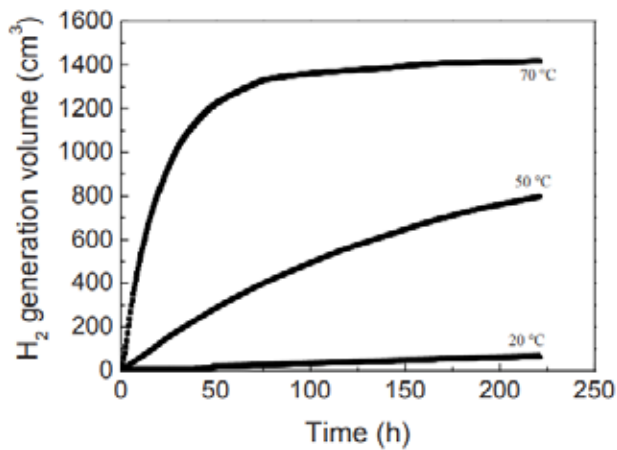


Рис. 2. Об'єм виділеного водню в часі за різних температур [4, с. 1197]

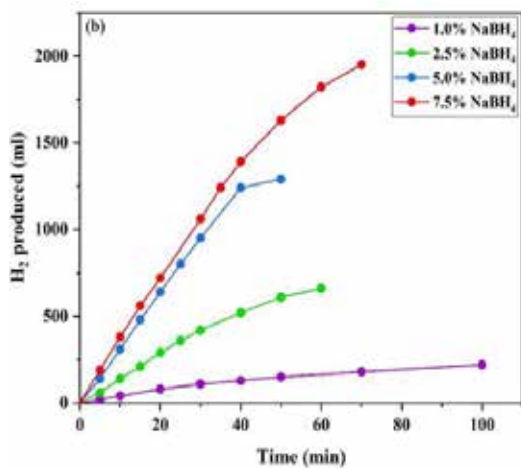


Рис. 3. Залежність об'єму виділеного водню від часу реакції за різних вихідних концентрацій борогідриду натрію [5, с. 29621]

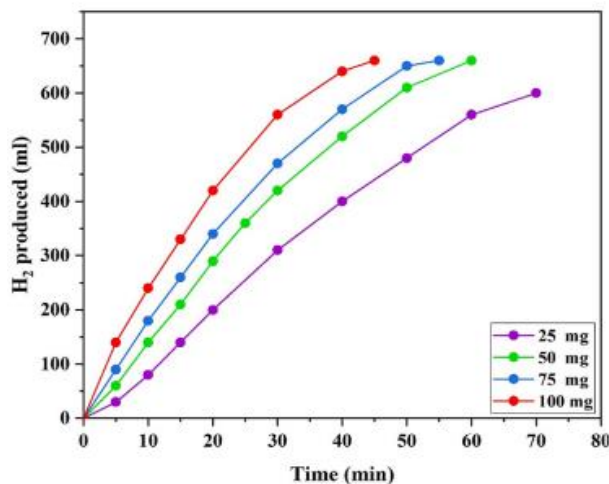


Рис. 4. Залежність об'єму виділеного водню від часу реакції за різної дози каталізатору [5, с. 29623]

Платина та рубідій є найактивнішими каталізаторами реакції гідролізу борогідриду натрію, але їх висока вартість та обмежені запаси перешкоджають їх широкому використанню [3, с. 5]. Показник виділення водню у присутності FeO сягає $325 \text{ см}^3/(\text{хв} \cdot \Gamma_{\text{кат}})$ [5, с. 29623]. Fe₃O₄ пришвидшує гідроліз борогідриду натрію лише втричі [6, с. 43].

Нікелеві ферити вважаються перспективними каталізаторами цього процесу, що пов'язано з одночасною присутністю в них іонів Me²⁺ та Me³⁺, які утворюють каталітично активну редокс-пару. Наприклад, у присутності CuFe₂O₄, показник виділення водню сягає $622 \text{ см}^3/(\text{хв} \cdot \Gamma_{\text{кат}})$ [7, с. 13065], $1500 \text{ см}^3/(\text{хв} \cdot \Gamma_{\text{кат}})$ [8, с. 23467] та $1810 \text{ см}^3/(\text{хв} \cdot \Gamma_{\text{кат}})$ [9, с. 128287]. Широко вживаний та загальновідомий фотокаталізатор TiO₂ та композити на його основі (NiO/TiO₂, SmO/TiO₂ та Sm/NiO/TiO₂) майже не демонструють каталітичної активності, їх показник виділення водню знаходиться на рівні $7\text{--}8 \text{ см}^3/(\text{хв} \cdot \Gamma_{\text{кат}})$ [10, с. 247]. Чистий NiFe₂O₄ дозволяє отримувати водень з показником $184 \text{ см}^3/(\text{хв} \cdot \Gamma_{\text{кат}})$ [11, с. 3977], а композитний NiB/NiFe₂O₄ – $300\text{--}766 \text{ см}^3/(\text{хв} \cdot \Gamma_{\text{кат}})$ [11, с. 3978].

Синергетичний ефект нанесення каталітичного активного нікелевого фериту на матрицю активованого вугілля підтвердили в процесі видалення барвника Конго червоного. Композитний нікелевий ферит з вмістом 20 % вуглецю демонстрував підвищену у 2,18 разів каталітичну активність у модельному процесі [12, с. 11633].

Постановка завдання. Метою досліджень є синтез композитного нікелевого фериту з високою каталітичною активністю в реакції генерування водню. Для досягнення мети було вирішено наступні завдання: проаналізовано сучасний стан досліджень нікелевих феритів та їх композитів; підбрано та відпрацьовано ефективний метод синтезу; з'ясовано вплив умов синтезу на фазовий склад; досліджено каталітичну активність; встановлено взаємозв'язок між умовами синтезу, структурно-кристалічними параметрами та каталітичною активністю.

Виклад основного матеріалу. Композитні нікелеві ферити синтезовано золь-гель методом. Вихідний розчин приготовано шляхом розчинення кристалогідратів Ni(NO₃)₂·6H₂O та Fe(NO₃)₃·9H₂O з молярним співвідношенням [Ni²⁺]:[Fe³⁺] = 1:2 у дистильованій воді. До вихідного розчину додавали: 1) цитратну кислоту, виходячи із розрахункового співвідношення катіони Me : цитратна кислота = 1:1; 2) активоване вугілля, виходячи із розрахункового співвідношення нікелевий ферит : АВ = 1:1. Отриману суміш повільно упа-

ривали при постійному перемішуванні за температури 80 °С до утворення гелю. Останній висушували за температури 230 °С протягом 3 годин. Отриманий ксерогель прожарювали за температур 400, 500 та 600 °С впродовж 2 годин в інертному

середовищі, а синтезовані зразки названі NFC1, NFC2 та NFC3, відповідно.

Інфрачервоний спектр композитного нікелевого фериту NFC2 (рис. 5) демонструє дві смуги поглинання, що відповідають коливанням тетра-

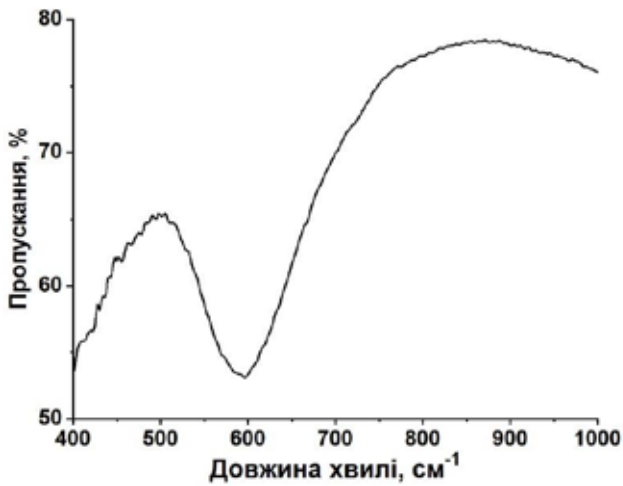


Рис. 5. Інфрачервоний спектр зразку NFC2

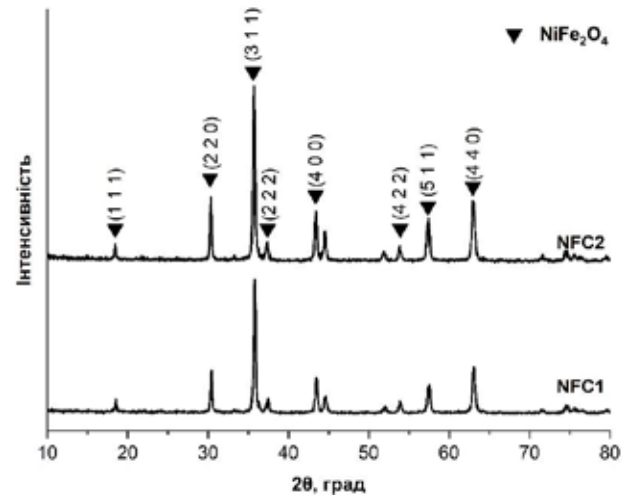


Рис. 6. Дифрактограми синтезованих зразків

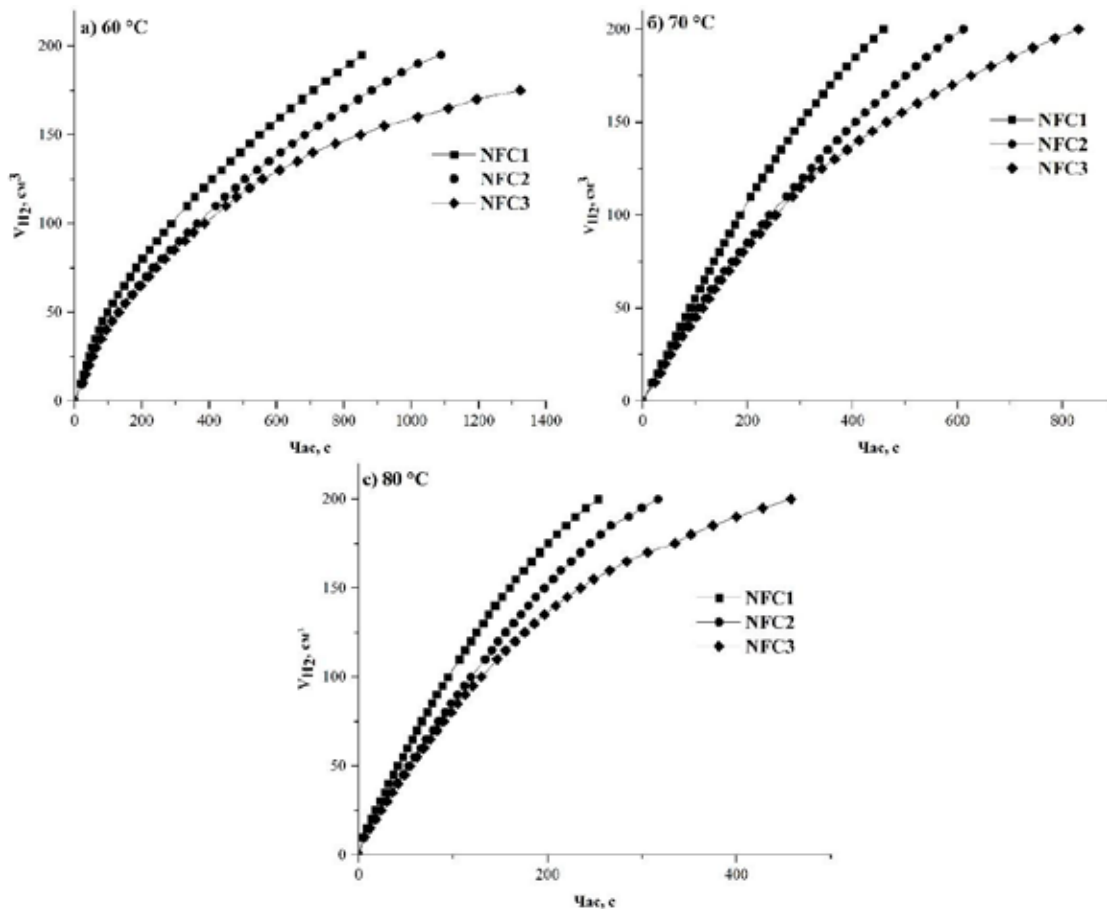


Рис. 7. Залежність об'єму виділеного водню від часу реакції за температур: 60 °С (а), 70 °С (б) та 80 °С (в)

Показник виділення водню, константа Арреніуса та енергія активації

Зразок	Температура, °C	ПВВ, см ³ /(хв·г _{кат})	k ₀ , с ⁻¹	E _a , кДж/моль
NFC1	60	800	4,74·10 ⁵	53
	70	2080		
	80	2180		
NFC2	60	710	2,86·10 ⁵	53
	70	1470		
	80	1710		
NFC3	60	600	9,86·10 ⁴	50
	70	1330		
	80	1420		

едричних (500 см³) та октаедричних (590 см³) положень, що підтверджує шпінельну структуру синтезованого зразку.

Дифрактограми синтезованих зразків підтверджують утворення цільової фази нікелевого фериту кубічної сингонії (рис. 6). Збіжність характеристичних піків зі стандартною РФА картою JCPDS 10-0325 свідчить про високу чистоту синтезованих композитних нікелевих феритів. Розмір їх кристалітів зменшувався з 25 до 22 нм з підвищенням температури прожарювання від 400 до 600 °C.

Каталітичну активність композитних нікелевих феритів досліджували на волюмометричній установці. Умови досліджень: доза каталізатору 0,01 г, концентрація борогідриду натрію 1 % (0,1 г), температура реакції 60, 70 та 80 °C, час вимірювань не більше 15 хв. Результати досліджень представлені у вигляді залежності об'єму виділеного водню від часу реакції (рис. 7). Як видно з рис. 7, швидкість виділення водню зростає зі збільшення температури реакції. У присутності композитного нікелевого фериту, прожареного за нижчої температури, водень генерувався активніше.

Результати розрахунку показника виділення водню (ПВВ), константи Арреніуса (k₀) та енергії активації (E_a) представлені у табл. 2. З наведених

даних видно, що підвищення температури реакції з 60 до 70 °C дозволяє підвищити швидкість виділення водню в 2–2,5 рази, в той час, як підвищення температури з 70 до 80 °C прискорює швидкість виділення водню лише на 5–15 %. Отримані значення енергії активації практично не залежать від умов синтезу і добре узгоджуються з літературними даними [11, с. 3978].

Висновки. Відпрацьовано умови синтезу композитного нікелевого фериту з активованим вугіллям модифікованим золь-гель методом, який дозволяє отримувати NiFe₂O₄ кубічної сингонії без побічних фаз (за даними рентгенівської дифракції) зі структурою зворотної шпінелі (за результатами інфрачервоної спектроскопії).

Встановлено, що синтезовані композитні нікелеві ферити з активованим вугіллям демонструють високу каталітичну активність в реакції виділення водню шляхом гідролізу борогідриду натрію у порівнянні з відомими літературними даними, що вочевидь викликано збільшенням питомої площі каталізатору. Найвищу каталітичну активність з показником виділення водню 2080 см³/(хв·г_{кат}) за температури реакції 70 °C продемонстрував композит, отриманий за найнижчої температури прожарювання, яка становила 400 °C.

Список літератури:

1. Electricity Mix. *Our World in Data*. URL: <https://ourworldindata.org/electricity-mix>
2. Hydrogen Storage. *Energy.gov*. URL: <https://www.energy.gov/eere/fuelcells/hydrogen-storage>
3. Abdelhamid H. N. A review on hydrogen generation from the hydrolysis of sodium borohydride. *International Journal of Hydrogen Energy*. 2021. Vol. 46, no. 1. P. 726–765. URL: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2020.09.186>
4. Vilarinho-Franco T., Tenu R., Delmas J. Lifetime Analysis of a Hydrogen Generator by Hydrolysis of Sodium Borohydride. *Energy Procedia*. 2013. Vol. 36. P. 1192–1201. URL: <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2013.07.135>
5. Ekinci A. Positive roles of microwave irradiation in hydrogen production from hydrolysis of sodium borohydride using iron oxide catalyst synthesized with watermelon seed peel extract by green method. *International Journal of Hydrogen Energy*. 2023. URL: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2023.04.166>

6. Sahiner N., Yasar A. O., Aktas N. H₂ generation from NaBH₄ methanolysis via magnetic field sensitive ionic liquid coated silica particles as catalyst. *Surfaces and Interfaces*. 2017. Vol. 8. P. 36–44. URL: <https://doi.org/10.1016/j.surfin.2017.04.006>
7. Tang M., Xia F., Gao C. Preparation of magnetically recyclable CuFe₂O₄/RGO for catalytic hydrolysis of sodium borohydride. *International Journal of Hydrogen Energy*. 2016. Vol. 41, no. 30. P. 13058–13068. URL: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2016.05.034>
8. Zhang E., Xu R., Wang L. One-pot synthesis of magnetic copper ferrite nanocubes for hydrogen production by hydrolysis of sodium borohydride. *Ceramics International*. 2023. URL: <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2023.04.178>
9. Alshammari H.A., Alshammari K., Alhassan S. Low temperature sol-gel synthesis of copper zinc ferrite for hydrogen catalytic hydrolysis of sodium borohydride. *Materials Chemistry and Physics*. 2023. P. 128287. URL: <https://doi.org/10.1016/j.matchemphys.2023.128287>
10. Avanash A.C., Ashif H., Faheem A.S. Preparation and application of Sm–Ni oxide doped TiO₂ nanofiber as catalyst in hydrogen production from sodium borohydride hydrolysis. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*. 2015. Vol. 484. P. 242–252. URL: <https://doi.org/10.1016/j.colsurfa.2015.08.007>
11. Liang Z., Li Q., Li F. Hydrogen generation from hydrolysis of NaBH₄ based on high stable NiB/NiFe₂O₄ catalyst. *International Journal of Hydrogen Energy*. 2017. Vol. 42, no. 7. P. 3971–3980. URL: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2016.10.115>
12. Zhu H.-Y., Jiang R., Huang S.-H. Novel magnetic NiFe₂O₄/multi-walled carbon nanotubes hybrids: Facile synthesis, characterization, and application to the treatment of dyeing wastewater. *Ceramics International*. 2015. Vol. 41, no. 9. P. 11625–11631. URL: <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2015.05.122>

Lesik S.M., Ivanenko I.M. COMPOSITE NICKEL-FERRITE CATALYST FOR HYDROLYSIS OF SODIUM BOROHYDRIDE

In the conditions of rapid development of science and technology, a significant lack of energy is one of the key problems of our time. Traditional energy resources such as oil, coal, natural gas, nuclear and hydropower have reached peak production. In addition, their use and transformation is accompanied by significant climatic changes and environmental pollution. More and more countries are trying to switch to non-traditional renewable energy sources, but the amount of ultraviolet in solar energy and the kinetic energy of the wind in wind energy are also limited. In this context, hydrogen, a resource with the highest energy density, the transformation of which is not accompanied by harmful emissions, attracts the most attention today. Transportation of pure hydrogen over long distances is accompanied by high explosiveness, which is a limiting factor for the wide spread of this technology. A model heterogeneous catalytic redox reaction of sodium borohydride hydrolysis is proposed for hydrogen generation. Composite nickel ferrite on a matrix of activated carbon, which was synthesized by the sol-gel method under different conditions of temperature treatment, was used as a catalyst. X-ray structural studies of the synthesized samples confirmed the formation of the target phase of cubic syngonia of nickel ferrite and demonstrated a slight dependence of the crystallite size on the change in the firing temperature, from 25 to 22 nm at temperatures from 400 to 600 °C, respectively. It was established that the highest catalytic activity is shown by the NFC1 catalyst, obtained at a calcination temperature of 400 °C. The catalytic activity of this sample was described by the rate of hydrogen evolution, which was 800, 2080, and 2180 cm³/(min·hcat) at reaction temperatures of 60, 70, and 80 °C, respectively. It was established that increasing the reaction temperature to 70 °C significantly accelerates the hydrolysis of sodium borohydride, and a further increase in temperature has a less significant effect.

Key words: nickel ferrite, sol-gel technology, catalysis, hydrolysis, sodium borohydride, spinel.

УДК 658.265

DOI <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2024.2/34>

Обушенко Т.І.

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

Толстопалова Н.М.

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

Сангінова О.В.

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

Мацюк К.В.

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

ДОСЛІДЖЕННЯ ФЛОТАЦІЙНОГО ОЧИЩЕННЯ СТІЧНИХ ВОД ШКІРЯНОГО ВИРОБНИЦТВА

Об'єктом дослідження є стічні води шкіряного заводу. Такі стічні води є висококонцентрованими і містять забруднюючі речовини різної ступені дисперсності, що зумовлюється використанням у процесі шкіряного виробництва великої кількості різноманітних хімічних речовин. Під час різних мокрих операцій, пов'язаних із вичинкою та обробкою шкур, усі ці речовини потрапляють в стічні води, які скидають в каналізацію. Стічні води шкіряного заводу характеризуються великими коливаннями складу та об'єму, високими концентраціями забруднень, високим вмістом зважених твердих речовин і мають певну токсичність. На жаль, існуючі методи очищення стічних вод підприємств шкіряної промисловості не забезпечують необхідну ефективність очищення, не дозволяють створити замкнутий оборот води на підприємствах, використовувати або регенерувати цінні компоненти стічних вод, та забезпечити економічно доцільну їх утилізацію. На нашу думку перспективи має метод флоатації. Тому метою статті є пошук флоатаційних реагентів для ефективного очищення стічних вод шкіряного виробництва після стадії фарбування.

Експерименти проводили в лабораторних умовах на пневматичній флоатаційній установці. Використовували 1%-ві водні розчини аніонних та катіонних ПАВ. Ефективність процесу флоатації визначали ступенем очищення стічної води за певної тривалості флоатації. Флоатаційне очищення стічних вод з використанням аніонних ПАВ майже не відбувалось. Реагентна флоатація катіонними ПАВ дозволяє очистити стоки на 94–100% за 10 хв. На ступінь очищення впливає тип ПАВ, рН, температура та доза ПАВ. Більшу флоатаційну активність виявив бромід гексадецилпиридинію $C_{19}H_{42}BrN$. Підвищення температури сприяє покращенню ефективності флоатації. В подальшому доцільно дослідити вплив на ефективність очищення стічних вод шкіряного виробництва витрати повітря, яка є важливим чинником флоатації, але не була врахована в цьому дослідженні.

Отримані дані планується використати для моделювання флоатаційного очищення стічних вод. Застосування такого очищення дозволить скоротити водоспоживання шляхом отримання очищеної води для власних потреб підприємств.

Ключові слова: флоатація, стічні води, шкіряне виробництво.

Постановка проблеми. Проблема очищення стічних вод набуває все більшої гостроти та актуальності у всьому світі, в тому числі й Україні. Удосконалення традиційних та розроблення нових методів і технологій водоочищення – важливе наукове завдання. Тому дослідження методів очищення стічних вод, які дозволяють вилучати

із води забруднення різного ступеня дисперсності є актуальними.

Виробництво шкіри є найстарішим у світі виробництвом і на теперішній час досягає близько 1,8 млн квадратних футів в рік [1]. Загальні річні обсяги виробництва шкіри в Україні за останніх 6 років коливаються в межах 2,5–4 тис. м² [2].

Промислове виробництво шкіряних виробів лідер по забрудненню гідросфери. Стічні води шкіряної промисловості містять велику кількість розчинних і нерозчинних сполук, мають неприємний запах, темний колір, піняться і є токсичними. Ступінь забруднення і об'єми стічних вод, які утворюються в процесі переробки шкіряної сировини, залежать від видів шкіри, технології виробництва і, перш за все, підготовчих процесів і дублення. Стічні води шкіряних підприємств представляють багатокомпонентні системи.

Використання традиційних способів очищення стічних вод підприємств шкіряної промисловості, що включають механічне, біохімічне, хімічне або реагентне очищення [4], не забезпечують необхідну ефективність очищення. Крім того, класичні схеми не дозволяють створити замкнутий оборот води на підприємствах, використовувати або регенерувати цінні компоненти стічних вод, та забезпечити економічно доцільну їх утилізацію. Слід відзначити, що досі немає надійних і ефективних схем очищення стічних вод шкіряних заводів [1].

Аналіз останніх досліджень і публікацій.

В останні роки шкіряна промисловість швидко розвивається. Водночас скидання стічних вод шкіряних заводів поступово стало одним із важливих джерел промислового забруднення.

Особливістю стічних вод шкіряного виробництва є їх багатокомпонентний склад забруднень різної природи (органічні і неорганічні), ступеня дисперсності (нерозчинні, колоїдні, молекулярні та іонні домішки), високі концентрації забруднюючих речовин та нерівномірність надходження у систему водовідведення [2]. При виробленні шкіри застосовують більше ніж 150 хімічних речовин. Під час різних мокрих операцій, пов'язаних із вичинкою та обробкою шкур, усі ці речовини потрапляють в стічні води, які скидають в каналізацію. Крім того, в стічні води переходять компоненти самих шкур, а саме: колагенові білки, жири й жироподібні речовини, деякі мінеральні речовини, що містять натрій, калій, кальцій, та інші елементи. Використання традиційних технологій для очищення висококонцентрованих стічних вод, зокрема, шкіряних заводів, має низку недоліків: вплив на ефективність очищення нерівномірності надходження стічних вод за витратами і концентраціями забруднень, залежність від температури (низька і швидка зміна температури уповільнюють процес), рН, токсичних для активного мулу речовин (СПАР, іонів важких металів, барвників тощо), невідповідність якості очищеної води встановленим нормам [3].

Найбільш ефективне рішення охорони водного басейну від діяльності шкіряних підприємств повинно мати комплексний характер і здійснюватися за рахунок зниження кількості забруднюючих речовин у стічних водах та забезпечення надійного фінішного очищення стічних вод з утилізацією зневодненого осаду. Зменшити кількість забруднюючих речовин можна за рахунок багаторазового повторного використання води шляхом створення водооборотних систем для окремих технологічних розчинів, що містять реагенти для вироблення шкір. Світова шкіряна промисловість переробляє на рік 4,8 млн. тон великих шкір при середній витраті води 65 м³ на 1 тону сировини, отримаємо загальну кількість споживаної води 300 млн. куб. води зростає до 450 млн. м³. З них 60% або 270 млн. м³ припадає на підготовчі та 40% або 180 млн. куб.м на переддубільні, власне дублення та фарбувально-жирувальні процеси [5]. Очищення такого обсягу води є найскладнішим і найдорожчим завданням. Витрати, пов'язані зі створенням очисних споруд, можуть сягати 40–50% всіх капітальних витрат за будівництво. У структурі витрат шкіряного виробництва витрати на експлуатацію очисних споруд та вирішення інших екологічних проблем іноді досягають 10%, що можна порівняти з оплатою всього персоналу (12–14%) [5].

Проблеми, що виникають із очищенням стічних вод шкіряних підприємств безпосередньо пов'язані з недостатнім рівнем технології та невисоким за сучасними мірками ступенем використання хімічних сполук, що застосовуються у шкіряному виробництві. Так, за даними журналу *Leder und Haute Markt* при виробленні хромових шкір для верху взуття 47% колагену дерми – найціннішого білкового продукту переходить у відходи, а сполуки хрому використовуються лише на 48% [5].

В роботі [6] обґрунтовано застосування флотаційного методу як найбільш придатного для очищення стічних вод шкіряних підприємств.

Переваги флотації обумовлені специфікою процесу:

- Для очищення використовується максимально просте обладнання, яке легко обслуговувати.
- Низька вартість поєднується з високою ефективністю (95–98%).
- При роботі з певними видами домішок флотація – найбільш практичне та ефективне рішення.
- Флотація практично не має аналогів при фільтрації молекул нафтопродуктів та інших специфічних домішок.

- На очистку не потрібно багато часу.
- Метод флотації легко комбінується з іншими очисними системами.

Ефективність флотації залежить від різних параметрів:

1. Чим більше гідрофобних часток, тим якісніше очищення. Для цього використовуються спеціальні реагенти, які змінюють властивості домішок.

2. Повітряні бульбашки повинні бути стійкі до руйнування. Для цього потрібні перевірені піноутворювачі.

3. Занадто великі бульбашки швидко спливають і не захоплюють з собою тверді частинки, а дрібні – не справляються з навантаженням і лопаються. Оптимальний розмір підбирається експериментально.

4. Значення також має рівномірність розподілу бульбашок в потоці та їх кількість.

На даний час проблема очищення стічних вод шкіряних заводів залишається актуальною, оскільки існуючі технології не забезпечують необхідної якості очищення таких вод – багатокомпонентних, з високим вмістом органічних речовин різної ступені дисперсності та токсичних для мікроорганізмів активного мулу біологічних очисних споруд речовин.

Постановка завдання. Метою статті є пошук флотаційних реагентів для ефективного очищення стічних вод шкіряного виробництва після стадії фарбування. Досліджено вплив реагентів різної природи та деяких технологічних параметрів на флотаційне очищення стічних вод.

Виклад основного матеріалу. Експерименти проводили в лабораторних умовах на пневматичній флотаційній установці. Вона складалась з циліндра об'ємом 1 дм³, диспергатора повітря та компресора. Піну, що утворювалась, видаляли механічно. Перевірено можливість використання іоногенних поверхнево-активних речовин (ПАР). Використовували 1%-ві водні розчини ПАР. Аніонні: каприлат калію C₈H₁₅O₂K, лаурилсульфат натрію C₁₂H₂₅O₄SNa, лаурат натрію C₁₂H₂₃NaO₂. Катіонні: бромід гексадецилпиридинію C₂₁H₃₈BrN, хлорид гексадецилпиридинію C₂₁H₃₈ClN·H₂O, бромід гексадецилтриметил амонію C₁₉H₄₂BrN.

Ефективність процесу флотації визначали ступенем очищення стічної води за певної тривалості флотації. Для оцінки якості флотаційного очищення стічних вод різного складу можна застосовувати універсальний показник – оптичну щільність очищеної води, тобто вирішувати завдання за допомогою спектрофотометрів або

мутномірів. Така можливість пов'язана з особливостями флотаційного розподілу фаз: при флотації між видаленням твердої фази, що зумовлює каламутність води, та забруднень у рідкій фазі (барвників, нафтопродуктів, олій і т. д.) спостерігається стійка кореляційна залежність, характерна для стічних вод ряду виробництв хімічної промисловості.

До стічної води об'ємом 1,2 дм³ додавали певну кількість ПАР, перемішували та через 5 хв (після агітації) включали компресор для флотації. Через 3, 5, 7 та 10 хв відбирали проби для визначення оптичної щільності на спектрофотометрі ULAB 101. Довжина хвилі 400 нм, довжина кювети 5 см.

Флотаційне очищення стічних вод з використанням аніонних ПАР майже не відбувалось в дослідженому інтервалі температур 15–25 °С, рН (4–8) та дози ПАР [7–8]. Спостерігалось значне піноутворення, але піна була білого кольору, пухка. А розчин стічної води залишався мутним і забарвленим.

Катіонні ПАР добре видаляють мутність та колірність. Досліджено вплив типу ПАР на ефективність видалення. Попередньо було встановлено, що очищення краще відбувається за нейтрального рН. Тому подальші досліді проводили без корегування рН. Температура підтримувалась на рівні 15–17 °С. Дозу ПАР змінювали від 8 до 15 см³.

На рис. 1 надано результати флотаційного очищення стічної води з використанням ПАР бромід гексадецилпиридинію C₁₉H₄₂BrN. Найбільший ступінь очищення отримано для дози 15 см³. Через 5 хв ступінь очищення складає 97,4%, через 7 хв – 98,7% і через 10 хв 99,4%. За 10 хв флотації і для менших доз ПАР досягається достатньо високе очищення: 8 см³ – 97,4%; 10 см³ – 99,4%.

На рис. 2 надано результати флотаційного очищення стічної води з використанням хлориду гексадецилпиридинію C₂₁H₃₈ClN·H₂O. За 10 хв досягаються високі ступені очищення для різних доз ПАР: 8 см³ – 91,9%; 10 см³ – 97,0%; 12 см³ – 88,6%; 15 см³ – 98,5%;

На рис. 3 надано результати флотаційного очищення стічної води з використанням броміду гексадецилпиридинію C₂₁H₃₈BrN. З цім ПАР отримано найгірші результати. Навіть для дози 15 см³ ступінь очищення складає 77,1% через 10 хв флотації. За менших доз ступінь видалення суттєво менший.

Як бачимо, найкращий результат очищення отримано для катіонного ПАР бромід гексадецилпиридинію C₁₉H₄₂BrN. Збільшення дози ПАР

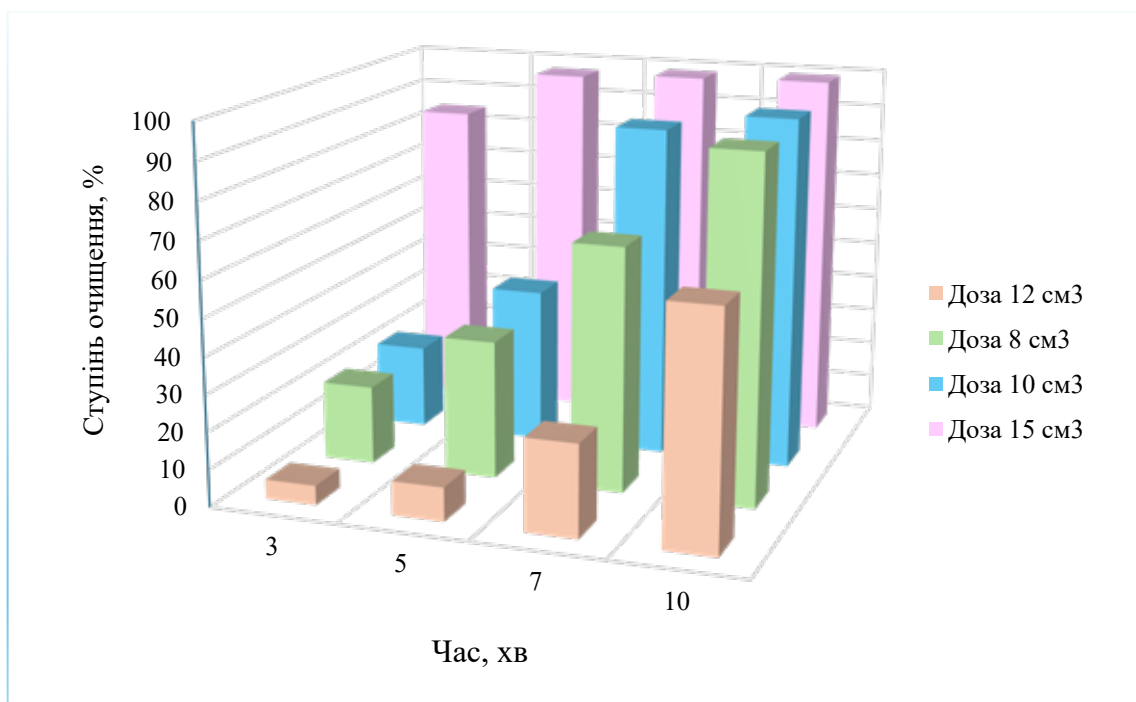


Рис. 1. Ефективність очищення від дози $C_{19}H_{42}BrN$ та тривалості флоатації

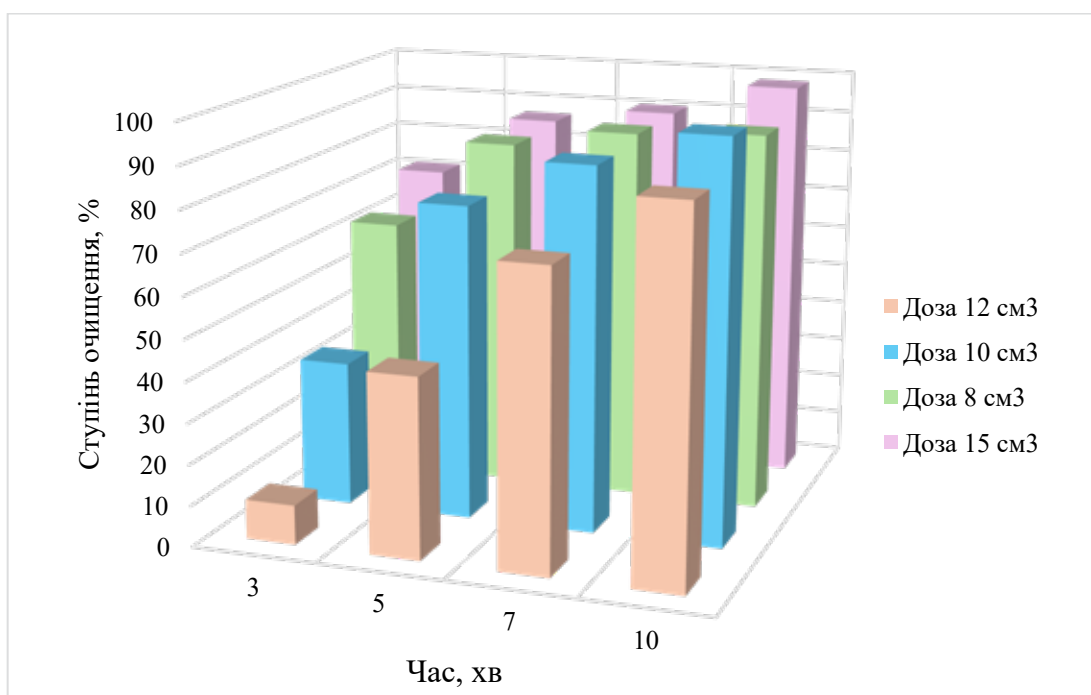


Рис. 2. Ефективність очищення від дози $C_{21}H_{38}ClN \cdot H_2O$ та тривалості флоатації

збільшує ступінь очищення, яка для дози 15 см³ досягає 99,4%. Подальше збільшення дози ПАР призводить до різкого погіршення очищення. Розчини навіть після 25 хв флоатації залишаються непрозорими.

Досліджено вплив температури на флоатаційне очищення стічної води з бромідом гексадецилпи-

ридинію $C_{19}H_{42}BrN$ при дозі 15 см³. Результати наведено в таблиці 1.

При постійній дозі $C_{19}H_{42}BrN$ зміна температури призводить до збільшення ступеня очищення. Це мабуть пов'язано з більшою розчинністю речовин у водному розчині, що полегшує флоатаційне видалення.

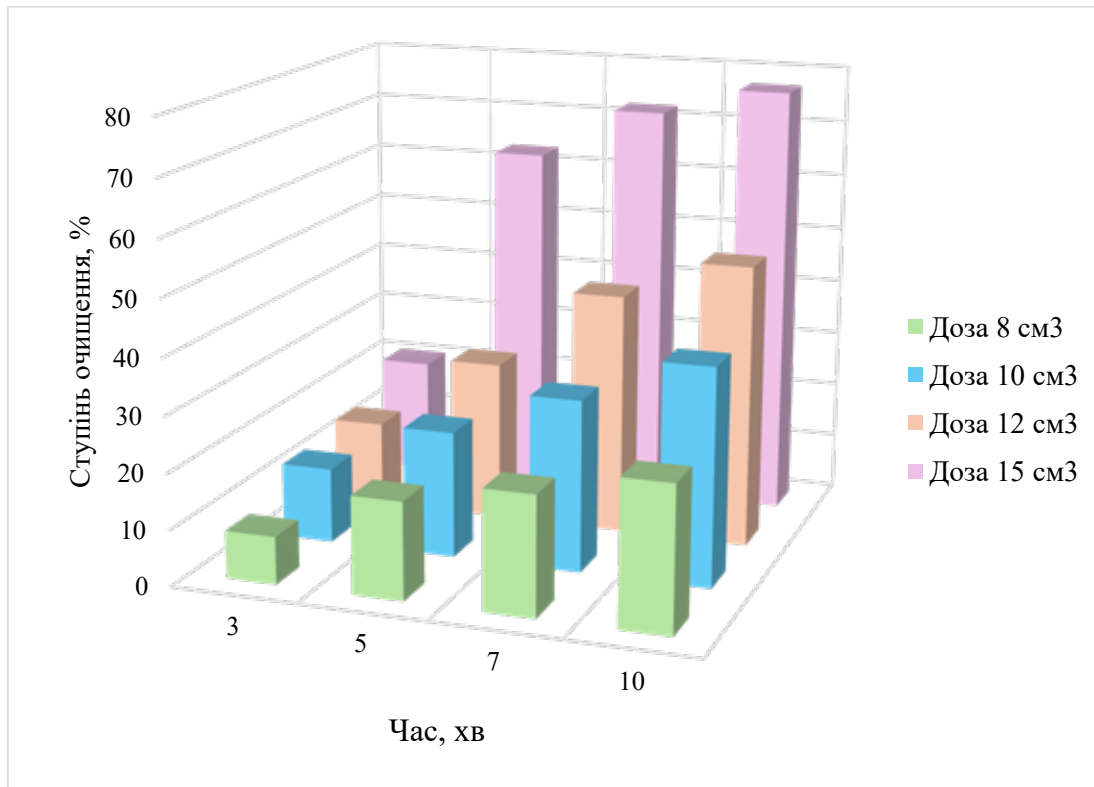


Рис. 3. Ефективність очищення від дози C₂₁H₃₈BrN та тривалості флоатації

Таблиця 1

Залежність ступеня очищення від температури

Температура, °C	Ступінь очищення (%) при тривалості флоатації, хв			
	3	5	7	10
15,0	38,3	71,4	86,8	97,5
18,0	68,6	94,7	98,7	99,4
24,0	80,4	96,9	99,4	100,0

Висновки. Запропоновано метод флоатаційного очищення стічних вод шкіряних виробництв, які відносяться до найбільш забруднених. Досліджено ефективність очищення реальних стічних вод з використанням аніонних та катіонних ПАВ. Аніонні ПАВ виявились не ефективними. Реагентна флоатація катіонними ПАВ дозволяє очистити стоки на 94–100% за 10 хв. На ступінь очищення впливає тип ПАВ, рН, температура та доза ПАВ. Досліджено ефективність очищення реальних стічних вод з використанням трьох катіонних ПАВ: броміду гексадецилпиридинію C₂₁H₃₈BrN, хлориду гексадецилпиридинію C₂₁H₃₈ClN·H₂O, броміду гексадецилтриметил амонію C₁₉H₄₂BrN. Результати свідчать

про більшу флоатаційну активність броміду гексадецилпиридинію C₁₉H₄₂BrN (повне очищення за дози 15 см³). Хоча, слід відмітити, що надлишок ПАВ погіршує ефективність очищення. Підвищення температури сприяє покращенню ефективності флоатації. В подальшому доцільно дослідити вплив на ефективність очищення стічних вод шкіряного виробництва витрати повітря, яка є важливим чинником флоатації, але не була врахована в цьому дослідженні.

Отримані дані планується використати для моделювання флоатаційного очищення стічних вод. Застосування такого очищення дозволить скоротити водоспоживання шляхом отримання очищеної води для власних потреб підприємств.

Список літератури:

1. P. Shanmugam, N. J. Horan Optimising the biogas production from leather fleshing waste by co-digestion with MSW // Bioresource Technology, № 100. – 2009. – p. 4117-4120.

2. Касьян Л. Е. Стан та перспективи розвитку легкої промисловості України // Науковий вісник Ужгородського національного університету. Випуск 6(1). – 2016. – С. 147-149.
3. Толстопалова Н.М. Моделювання флотаційного очищення стічних вод від іонів хрому (Ш)/Вчені записки Таврійського національного університету імені В.І. Вернадського. Серія: Технічні науки, Т. 34 (73) № 4, 2023. С. 213-218.
4. Запольський А.К. Водопостачання, водовідведення та якість води. – К.: Вища школа, 2005. – 671 с
5. Саблій Л. А. Фізико-хімічне та біологічне очищення висококонцентрованих стічних вод : монографія / Л. А. Саблій. – Рівне : НУВГП, 2013. – 291 с.
6. Саблій Л. А. Попереднє очищення стічних вод шкіряних заводів фізико- хімічними методами / Л. А. Саблій, О. М. Бунчак, В. П. Плаван // Вісник Київського національного університету технологій та дизайну. – 2013. – № 1 (69). – С. 117-122.
7. Грушевський О. Ф., Загурська Д. Д., Обушенко Т. І., Толстопалова Н. М., Сангінова О. В. Флоатаційне очищення стічних вод шкіряного виробництва // Modern research in science and education. Proceedings of the 4th International scientific and practical conference. BoScience Publisher. Chicago, USA. 2023. Pp. 189-192.
8. Загурська Д. Д., Мацюк К. В., Обушенко Т. І., Толстопалова Н. М., Сангінова О. В. Вплив різних чинників на ступінь очищення стічних вод шкіряного виробництва // Current challenges of science and education. Proceedings of the 4th International scientific and practical conference. MDPC Publishing. Berlin, Germany. 2023. Pp. 174-177.

Obushenko T.I., Tolstopalova N.M., Sanginova O.V., Matsiuk K.V. RESEARCH OF FLOTATION TREATMENT OF LEATHER MANUFACTURING WASTEWATER

The object of the study is wastewater from a tannery. Such wastewater is highly concentrated and contains pollutants of varying degrees of dispersion, which is due to the use of a large number of various chemicals in the leather production process. During the various wet operations associated with the skinning and processing of hides, all these substances enter the wastewater, which is discharged into the sewer. Tannery wastewater is characterized by large fluctuations in composition and volume, high concentrations of pollutants, high content of suspended solids and certain toxicity. Unfortunately, the existing methods of wastewater treatment of leather industry enterprises do not provide the necessary cleaning efficiency, do not allow to create a closed circulation of water at enterprises, to use or regenerate valuable components of wastewater, and to ensure their economically feasible disposal. In our opinion, the flotation method has prospects. Therefore, the purpose of the article is to find flotation reagents for effective treatment of wastewater from leather production after the dyeing stage.

Experiments were carried out in laboratory conditions on a pneumatic flotation device. 1% aqueous solutions of anionic and cationic surfactants were used. The efficiency of the flotation process was determined by the degree of purification of wastewater for a certain duration of flotation. Flotation treatment of wastewater using anionic surfactants almost did not occur. Reagent flotation with cationic surfactants allows to purify wastewater by 94–100% in 10 minutes. The degree of purification is affected by the type of surfactant, pH, temperature and dosage of surfactant. Hexadecylpyridinium bromide $C_{19}H_{42}BrN$ showed greater flotation activity. An increase in temperature helps to improve the efficiency of flotation. In the future, it is advisable to investigate the influence of air flow, which is an important factor in flotation, on the efficiency of wastewater treatment of leather production, but was not taken into account in this study.

The obtained data are planned to be used for modeling the flotation treatment of wastewater. The use of such purification will allow to reduce water consumption by obtaining purified water for the enterprises' own needs.

Key words: flotation, wastewater, leather production.

Trembus I.V.

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

Mykhailenko N.V.

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

Hondovska A.S.

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

USED PULPING LIQUORS APPLICATION IN OXIDATIVE – ORGANOSOLVENT TECHNOLOGY OF STRAW CELLULOSE PRODUCTION

The study demonstrated the production of oxidative pulp from wheat straw stalks using the acetic acid-water-hydrogen peroxide system with the addition of 0.5% citric acid by weight of dry raw materials as a catalyst. The cooking solution consisted of 75% ice-cold acetic acid and 25% water by volume, with the addition of 50% hydrogen peroxide by weight of dry raw materials. The delignification process of non-woody plant material was studied at a hydraulic module of 10:1, using different temperatures and durations (80-100°C, 60-180 minutes, respectively). The straw pulp obtained has high-quality indicators. The yield ranges from 55.1% to 84.7%, with residual lignin content of 1.2% to 6.7% by weight of absolute dry raw material. Additionally, it has a tearing resistance of 200-510 mN and a tensile strength of 2500-7000 m. This pulp can be used in the composition of various types of cardboard and paper products. The research analysis revealed that a method of regenerating spent cooking solutions during oxidative-organosolvent cooking of non-woody plant material involves returning a portion of the spent cooking solution for re-cooking. The residual concentrations of delignifying substances in the spent cooking solution were measured. It was discovered that the primary delignifying reagent, peroxyacetic acid, was only used in amounts ranging from 37-53%. Experimental results have shown that adding a spent solution, comprising 10% of the fresh solution, does not significantly reduce the quality of the resulting straw pulp. In fact, it increases the yield by 1.3% while only increasing the residual lignin content by 0.52% by weight. The infrared spectra of oxidized lignin and straw pulp were obtained with and without the addition of spent pulp to the fresh cooking solution. It was found that the precipitated oxidative lignin contains a small amount of polysaccharide component.

Key words: oxidative-organosolvent delignification, wheat straw, cellulose, lignin, regeneration, spent cooking solution, infrared spectrum.

Formulation of the problem. The environmental and technological evaluation of existing methods for obtaining technical cellulose has changed significantly all over the world. Strict requirements for industrial effluents composition and gaseous emissions in pulp and paper industry fundamentally raised the question of necessity to abandon technologies using chlorine and sulfur compounds [1]. Non-wood plant raw materials, namely the straw of cereal crops, are processed into fibrous semi-finished products mainly by alkaline cooking methods – sodium and sulfate. Taking into account high ash content of raw material, short fiber length, macro and microstructure heterogeneity, number of technological complications arise during such raw materials delignification [1, 2]. During alkaline delignification of cereal crops straws almost all mineral substances are transferred

to used cooking liquors which causes difficulties in evaporation, causticization processes and burning of lime sludge [3].

Catalytic oxidation delignification methods of plant material using hydrogen peroxide in acidic environment are being considered at the moment [4, 5]. Oxidative-organosolvent methods are environmentally friendly and resource-saving that make possible to obtain fibrous semi-finished products with high yield, low energy consumption and absence applying harmful substances in process. It should be noted that oxidative-organosolvent technologies include complex processing of plant raw materials. They make possible to utilize hemicelluloses and isolate reactive lignin from pulp liquors which further processed into valuable chemical products [6].

Peracetic acid is one of the promising reagents for vegetable raw materials delignification. Plant raw materials cooking with this acid take place at temperatures up to 100°C, without excess pressure and with high delignification process selectivity [7, 8]. The pulp which obtained in this way characterized by high yield and whiteness, which indicates low lignin content in solid residue. Peracetic acid can be prepared in various ways including from acetic acid which is multitonnable and relatively cheap product of wood chemistry and other chemical synthesis [9]. The issue of used cooking solutions regeneration remains unresolved in proposed technologies of oxidizing-organosolvent pulp production.

Analysis of recent research and publications. Most studies of plant raw materials processing into cellulose are devoted to research chemical processes, delignification kinetics, technical cellulose properties and components of destruction in lignocarbon complex. Only some works consider the issue of processing and multiple application used cooking solutions [10, 11]. Acetic acid working solution after cooking plant raw materials does not contain mineral components, which simplifies its complex processing and allows it to be partially returned to technological cycle in contrast to sulfite and sulfate pulp obtaining methods. In the study [10] it is proposed to regenerate acetic acid using azeotropic distillation method in wood processing with aqueous environment of ethanol and acetic acid mixture. Used cooking solution is regenerated in vacuum evaporator during wheat straw processing [12, 13]. The regenerated clear distillate is returned to technological process while low molecu-

lar weight lignin is isolated from the cubic residue. However, components removal from cubic residue is complicated by resinous substances accumulation. Oxidative-organosolvent process with using returned solutions for further cookings with insufficient amount replenishment of delignifying reagents can be considered promising from the point of view of regeneration [14]. Therefore, improving cellulose obtaining technology by oxidation-organosolvent delignification methods from non-wood plant materials with used cooking solutions recovery is urgent task today.

Setting objectives. The work purpose is to evaluate possibility of using spent cooking solutions after oxidative-organosolvent cooking of wheat straw to obtain technical cellulose.

Presentation of main research material. The characteristic features of fibrous mass from wheat straw are primarily determined by its chemical composition. Its definition was carried out in accordance with the existing TAPPI standards [15] for various plant raw materials components, namely: T-222 – for lignin; T-257 – for substances extracted with hot water; T-212 – for substances extracted with 1 % NaOH; T-204 – for substances extracted with alcohol-benzene solution; T-211 – for determination of ash content (Fig. 1).

During the study of obtaining straw cellulose process in the system "acetic acid–water–hydrogen peroxide", the technological indexes developed by authors [12] were taken as basis. Citric acid was used as catalyst in amount of 0,5 % by weight of absolute dry raw material. It was conducted number of experi-

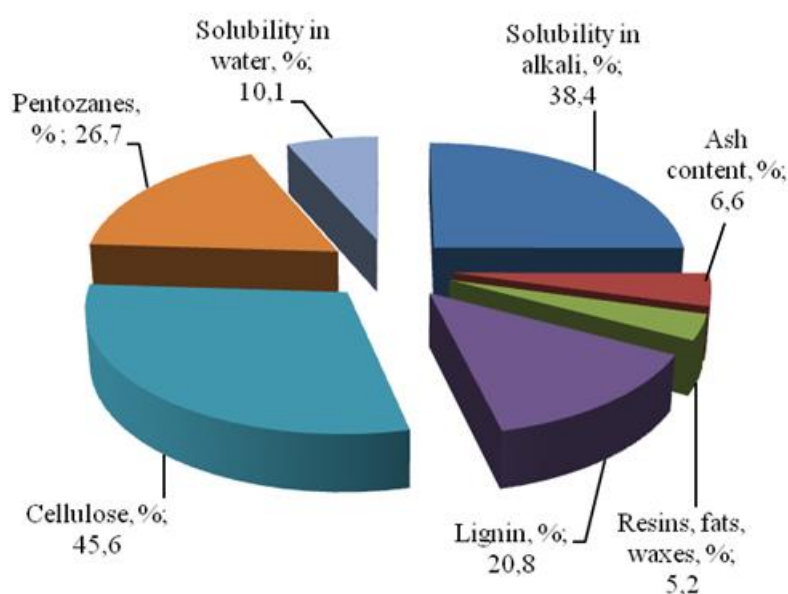


Fig. 1. Chemical composition of wheat straw stalks

mental studies of wheat straw delignification process with cooking solution containing glacial acetic acid and water in their ratio 75:25 % by volume, with addition 50 % H₂O₂ by weight of absolute dry raw material. Process took place at hydromodule 10:1, at different temperatures (80–100°C) and durations (60–80 min.) in glass flasks at atmospheric pressure.

The delignification process of plant raw materials in studied system takes place in mild conditions with significant swelling of plant fibers. Increasing technological parameters, primarily temperature, accelerates delignification process, which allows obtain cellulose with high yield 55,1–84,7 %, low residual lignin content 1,2–6,7 % and high strength indicators (tear resistance 200–510 mN, breaking length 2500–7000 m).

Used cooking solution is subject of regeneration after peroxyacetic delignification method of plant raw materials, but it should be noted that there are certain disadvantages associated with solvent regeneration [14]:

- high boiling point of acetic acid (118,1°C);
- azeotrope formation during rectification process of acetic acid with insufficient content for direct usage for cellulose obtaining process (azeotrope boiling temperature is 124,1°C).

These problems not only complicate solvent regeneration, but also lead to its loss. Most of hydrogen peroxide spent on peroxyacid formation with subsequent oxidation of lignin. The remainder is lost during its decomposition with molecular oxygen formation and cannot be regenerated [12, 14].

After analyzing used solution it was established that peracetic acid concentration in solution decreases from 4,3 to 2,8 %, depending on temperature and process duration. It was experimentally established that during hot peroxyacetic acid preparation, its maximum concentration is at level 7,3–7,9 %. It is advisable to reuse spent cooking solution for wheat straw cooking process based on fact that main delignifying reagent was used only in the amount 37–53 %.

It is worth noting that in delignification process cooking solution affects entire plant raw materials complex. At the same time, main lignin destruction products mass, part of hemicelluloses, extractive

substances and cellulose is also partially destroyed. Complex of substances accumulates in reactor, which are very difficult to isolate and identify as a result of all these reactions.

To determine lignin content in dry residue organic part composition it was used a technique consists of leaching lignin compounds with sulfuric acid with concentration 30 % at pH 1–2 [16]. The solid residue was not treated with acid as pH of used cooking solution was 2. The lignin sediment formed in settling process was filtered through glass filter and used for further research. The settled liquor was used for adding to fresh cooking solution in delignification process of wheat straw stalks.

Cooking with the system "acetic acid-water-hydrogen peroxide-citric acid" was carried out in order to study the effect of using spent cooking solution in composition with fresh one. The process was carried out at temperature 100°C and duration 90 minutes with content of used filtered cooking solution in composition with fresh one from 5 to 25 %. The results of the research are shown in Table 1.

The research results make it possible to state that increasing amount of spent cooking solution leads to slight increase in yield. But it is worth noting that used liquors addition simultaneously leads to increasing residual lignin amount in obtained technical cellulose.

It was experimentally established that this tendency is much less pronounced in case of adding filtered cooking solution. Increasing content of used solution by more than 15 % worsens the delignification process. It was established that lignin content increases sharply by 1,8 % and the whiteness of pulp visually decreases. Used cooking solution should be apply only in small quantities of 10–15 % and in filtered state for re-cooking despite the fact that it contains sufficient amount of delignifying reagent.

The IR spectroscopy was utilized to examine structure of cellulose samples derived from oxidative delignification of wheat straw and residual solid matter left after processing (Fig. 2). Spectra were collected in the range of 400–4000 cm⁻¹. Sample 1 consisted of oxidized lignin, while sample 2 represented cellulose obtained through cooking in acetic acid-wa-

Table 1

Quality indicators of straw semi-finished fibre products from the content of spent cooking solution in the composition of fresh cooking solution

Quality indicators, %	Fraction of spent cooking solution/spent and filtered, %					
	0	5	10	15	20	25
Yield	63,8	64,2/63,9	65,1/64,1	66,3/65,8	66,1/66,2	68,2/67,8
Content of residual lignin	1,98	2,2/2,0	2,5/2,1	3,0/2,3	3,8/2,8	4,9/3,0

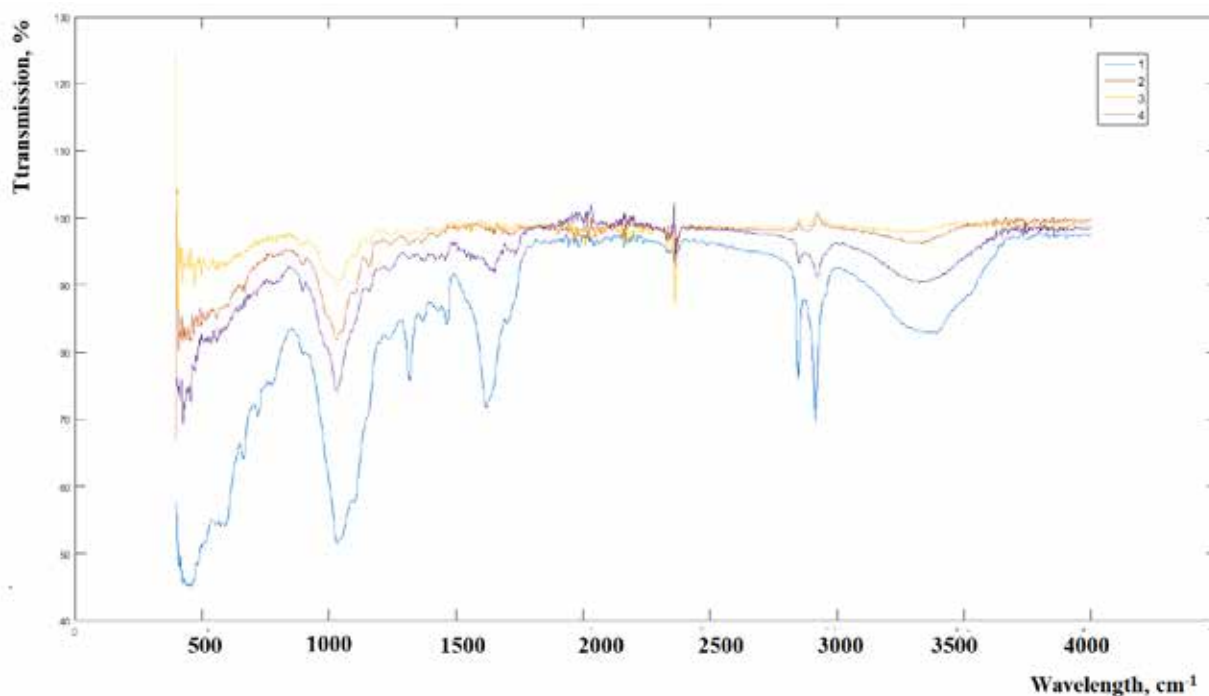


Fig. 2. IR spectrum of laboratory organosolvent lignin and straw cellulose samples

ter-hydrogen peroxide-citric acid system. Samples 3 and 4 were prepared similarly but using 10 % spent cooking solution and spent filtered cooking solution, respectively. All samples exhibited a broad absorption band in the 3000–3600 cm^{-1} range, attributed to O-H vibrational oscillations, along with absorption bands at 2838 and 2914 cm^{-1} corresponding to C-H oscillations. These bands are present due to hydroxyl groups and C-H bonds found in cellulose, hemicellulose, and lignin. However, higher intensity of the band in 3000–3600 cm^{-1} range for sample 1 is indicative of higher moisture content. The presence of absorption band at 1745 cm^{-1} is attributed to stretching vibrations of C=O in hemicelluloses and lignin. Moreover, this band is more prominent in sample 1, suggesting higher lignin and hemicellulose content in its structure. Treatment of raw material with peroxyacid resulted in removal of these components, leading to significant reduction in intensity of the 1745 cm^{-1} band for samples 2, 3, and 4.

The absorption peak at 1618 cm^{-1} corresponds to asymmetric vibrations of carboxyl group of glucuronic acid in hemicelluloses and C=O vibrations within lignin's structure. Following treatment, there's notable decrease in intensity of this peak, further confirming delignification process. Additionally, absorbed H_2O presence contributes partially to band

at 1618 cm^{-1} in samples IR spectra. The absorption bands at 1457, 1424, 1370, and 1317 cm^{-1} are indicative of samples containing lignin and stem from C-H deformation vibrations in CH_2 and CH_3 groups. It's evident that sample 1 exhibits higher lignin content compared to samples 2, 3, and 4. Across all samples, bands at 1160 and 896 cm^{-1} arise from C-O-C stretching in β -(1 \rightarrow 4)-glycosidic bonds within cellulose and hemicellulose. Due to its lignin content, sample 1 also presents absorption band at 846 cm^{-1} , corresponding to C-H fluctuations in aromatic structure of lignin.

Conclusions. It was determined that straw cellulose with high quality indicators was obtained by cooking in acetic acid – hydrogen peroxide – water system of hay straw with citric acid addition in the amount 0,5 % according to the results of comprehensive research.

The chemical composition of spent cooking solution after wheat straw delignification was analyzed. It was determined that application of used solutions and solutions after oxidized lignin planting in amount of 10 % in composition work cooking solution does not deteriorate obtained straw cellulose quality indicators.

It was established that planted oxidized lignin contains small amount of polysaccharide component in its composition with using IR spectroscopy.

Bibliography:

1. Cybulska I., Brudecki G. P., Zembrzuska J. Organosolv delignification of agricultural residues (date palm fronds, *Phoenix dactylifera* L.) of the United Arab Emirates. *Applied Energy*. 2017. No. 185, P. 1040-1050.
2. Dapia S., Santos V., Parajo J. C. Formic acid-peroxyformic acid pulping of *Fagussylvatica*. *Journal of Wood Chemistry and Technology*. 2000. No. 20, P. 395-413.
3. Nakano J., Kitanaka Y. Chemical Pulping of Straws (III). Properties of ash and Behaviors of Ash in Alkaline Cooking. *Japan Tappi Journal*. 1996. Vol. 50, No. 4, P. 692-696.
4. Barbash V.A., Trembus I.V., Nagorna J.M. Pulp obtaining from ornstalks. *Chemistry & chemical technology*. 2012. No. 1, P. 83–87.
5. Poppius–Levlin K., Mustonen R., Huovila T., Sundquist J. MILOX pulping with acetic acid/peroxyacetic acid. *Paper i ja Puu*. 1991. No. 2, P. 154–158.
6. Oral J., Sikula J., Puchy R., Hajny Z., Stehlik P., Bebar L. Processing of waste from pulp and paper. *Journal of Cleaner Production*. 2005. No. 13, P. 509-515.
7. Kham L., Bigot Y.L., Delmas M., Avignon G. Delignification of wheat straw using a mixture of carboxylic acid and peroxy acids. *Industrial crops and products*. 2005. No. 5, P. 9–15.
8. Barbash V., Trembus I., Sokolovska N. Performic pulp from wheat straw. *Cellulose chemistry and technology*. 2018. Vol. 7-8, No. 52, P. 673-680.
9. Constant S., Basset C., Dumas C., Renzo F. Di, Robitzer M. Reactive Organosolv Lignin Extraction from Wheat Straw: Influence of Lewis Acid Catalysts on Structural and Chemical Properties of Lignins. *Industrial Crops and Products*. 2015. Vol. 65, P.180-189.
10. Barbash VA, Makarenko AA, Bondar RV, Bondar SE, Trembus IV. Poluchenye voloknistykh polufabrykatov yz sorho sakharnoho. *Enerhotekhnolohyy u resursosberezhenye*. 2010. No. 2, S. 38-41.
11. Edel R. M., Brunow G. Reactions of β -aryl ether lignin model compounds under formic acid and peroxyformic acid pulping conditions. *The Intern. Symp. on Wood and Pulping Chemistry*. Raleigh, USA. 1989. May 22–25.
12. Trembus I.V., Sokolovska N.V. Delihnifikatsiia pshenychnoi solomy v systemi $\text{CH}_3\text{COOOH-H}_2\text{O-H}_2\text{O}_2$. *Wshodnioeuropejskie Czasopismo Naukowe East European Scientific Journal*. 2018. No. 2, S. 61-66.
13. Abad S., Santos V., Parajo J. C. Formic acid-peroxyformic acid pulping of aspenwood: an optimization study. *Holzforchung*. 2000. No. 54, P. 544-552.
14. Trembus I., Trophimchuk J., Deykun I., Cheropkina R. The catalytic delignification of sunflower stalks with hydrogen peroxide in the environment of acetic acid. *Journal of Chemical Technology and Metallurgy*. 2021. Vol. 56, No. 2. P. 296-301.
15. TAPPI test methods. *Tappi Press*. Atlanta, Georgia. 2004.
16. Trembus I.V., Hondovska A.S., Tinytska Ye. Yu., Mykhailenko N.V. Resource-saving oxide-organo-solvent technology of straw fiber semi-finished products. *Вчені записки Таврійського національного університету імені В.І. Вернадського. Серія: Технічні науки*. 2022. Т. 33 (72). № 2, С. 80-84.

Трембус І.В., Михайленко Н.В., Гондовська А.С. ВИКОРИСТАННЯ ВІДПРАЦЬОВАНИХ ЩОЛОКІВ В ОКИСНО-ОРГАНΟΣОЛЬВЕНТНІЙ ТЕХНОЛОГІЇ ОДЕРЖАННЯ СОЛОМ'ЯНОЇ ЦЕЛЮЛОЗИ

Показано можливість отримання окисної целюлози із стебел пшеничної соломи в системі «оцтова кислота-вода-пероксид водню» з додаванням в якості каталізатора лимонної кислоти в кількості 0,5 % від маси абсолютно сухої сировини. Варильний розчин містив льодяну оцтову кислоту та воду у співвідношенні 75 : 25 об'ємних %, з додаванням 50 % пероксиду водню від маси абсолютно сухої сировини. Процес делігніфікації недеревної рослинної сировини досліджувався за гідромодуля 10 : 1, різної температури та тривалості (80–100 °С, 60–180 хв, відповідно). Одержана солом'яна целюлоза має високі показники якості: вихід 55,1–84,7 %, вміст залишкового лігніну 1,2–6,7 % від маси абс. сух. сировини, опір роздиранню 200–510 мН, розривну довжину 2500–7000 м і може бути використана в композиції масових видів картонно-паперової продукції. Аналіз досліджень показав, що для регенерації відпрацьованих варильних розчинів за окисно-органосольвентного варіння недеревної рослинної сировини використовують спосіб повернення частини відпрацьованого розчину на повторне варіння. Визначено залишкові концентрації делігніфікуючих речовин у відпрацьованому варильному розчині. Встановлено, що основний делігніфікуючий реагент, пероксооцтова кислота, використана лише у кількості 37–53 %. Експериментально встановлено, що додавання

відпрацьованого розчину у кількості 10 % у складі свіжого розчину не значно погіршує показники якості одержаної солом'яної целюлози (вихід зростає на 1,3 %, при цьому збільшується вміст залишкового лігніну на 0,52 % від маси. абс. сух. сировини). Отримано ІЧ спектри окисного лігніну та солом'яної целюлози, одержаної з додаванням і без додавання до свіжого варильного розчину відпрацьованого щолоку. Встановлено, що висаджений окисний лігнін містить у своєму складі незначну кількість полісахаридної складової.

Ключові слова окисно-органосольвентна делігніфікація, пшенична солома, целюлоза, лігнін, регенерація, відпрацьований варильний розчин, ІЧ-спектроскопія.

ТРАНСПОРТ

УДК 531.3

DOI <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2024.2/36>

Биковець Н.П.

Дунайський інститут

Національного університету «Одеська морська академія»

АНАЛІЗ ВПЛИВУ БІОБРОСТАННЯ КОРПУСУ СУДНА НА ДИНАМІКУ РУХУ СУДНА

Підвищення експлуатаційних характеристик є одним із найважливіших питань технічних об'єктів. Для судна дана продуктивність головним чином залежить від ефективності його головної силової установки та опору, що створюється під час його руху. Через важливість енергетичної ефективності та скорочення викидів у судноплаванні було розроблено низку числових моделей для оцінки характеристик судна. Такі моделі включають різні компоненти, наприклад, опір спокійній воді. Загальний опір судна, у свою чергу, залежить від опору тертю корпусу через наявність різних типів шорсткості на поверхні корпусу, включаючи біобростання підводної частини. Біологічне обростання та забруднення моря створюють серйозні проблеми для морської галузі, що спонукає до великих дослідницьких зусиль для визначення ефективних рішень. У статті проаналізовано вплив біобростання корпусу судна на окремі параметри, що характеризують ефективність руху судна. Зокрема, розвиток шару біобростання, коли на поверхні судна накопичуються мікро- і макроорганізми, призводить до значного зниження швидкості судноплавства. Зниження швидкості впливає на збільшення часу плавання судна та витрати палива. Міжнародною морською організацією визнано, що неузгоджена політика запобігання біобростанню та підводного очищення створює серйозні проблеми для судноплавної галузі. Очищення корпусів суден від шару слизу різної завтовшки, що покриває до 50% поверхні корпусу, може знизити викиди парникових газів на судні від 20 до 55% залежно від характеристик судна, швидкості та інших переважаючих умов. Проведений аналіз залежності опору тертю від швидкості руху судна. Продемонстровано спосіб розв'язку задачі щодо динаміки прямолінійного руху судна. Наведені методи розрахунків можуть бути застосовані при виконанні порівняльного аналізу зміни швидкості та пройденого шляху судном в залежності від ступеню біобростання.

Ключові слова: біобростання, шорсткість корпусу судна, опір, швидкість, забруднення.

Постановка проблеми. У міжнародному судноплаванні глобальним та актуальним питанням з експлуатаційної та еколого-гігієнічної точок зору є проблема морського обростання підводної частини судна. Причиною є біологічні обростання на змочених поверхнях. Наростання на підводній частині борту у вигляді скупчення мікроорганізмів, водоростей, рослин чи тварин (особливо моллюски) призводять до зниження експлуатаційної здатності суден, до збільшення витрат палива та зменшення швидкості руху суден. На швидкість біобростання впливають наступні фактори, серед яких: період простою судна, тривалість рейсу, швидкість руху судна, місце розташування, фактори навколишнього природного середовища, зокрема річні та сезонні коливання температури. Через підвищення температури пришвидшуються процеси росту клітин, корозії зануреної частини корпусу судна [1]. Мор-

ське біобростання призводить до збільшення шорсткості корпусу, що є наслідком зростання супротиву судна, турбулентності та поверхневого тертя. У результаті збільшуються обсяги споживання палива, викидів парникових газів і поширення шкідливих видів.

Згідно з доповіддю, опублікованою Міжнародною морською організацією (International Maritime Organization (IMO) у січні 2022 року [2], неузгоджена політика запобігання біобростанню та підводного очищення створює серйозні проблеми для судноплавної галузі. Проте у звіті зазначені деякі країни, регіони та зони, де діє політика та практика запобігання біобростанню. У звіті сформульований висновок, що комплексна політика управління біобростанням не набула широкого поширення, а вимоги не узгоджені серед країн, що впроваджують ці заходи, включаючи Нову Зеландію та Каліфорнію.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Біообростання корпусу судна та гребного гвинта призводить до збільшення шорсткості цих поверхонь, що відображується на підвищенні гідродинамічного опору корпусу та зниженні ефективності роботи гребного гвинта, зростає потреба у збільшенні потужності для руху судна із заданою швидкістю, що є наслідком значних витрат палива, викидів забруднюючих речовин у повітря та парникових газів (рис. 1).

Згідно з проведеними у [4] розрахунками для суден легкої водотоннажності легке шламове покриття, що вкриває усю поверхню корпусу, може збільшити загальний опір на 7–9%, а важке покриття – на 15–18%. Морські водорості та дрібні молюски підвищують опірність ще на 20–30% [4]. Існує пряма кореляція між шорсткістю корпусу судна та його забрудненням. Згідно з розрахунками, опір тертю у суден, що йдуть з високими швидкостями, зростає на 5% на кожні 10–20 мкм збільшення шорсткості корпусу (рис. 2).

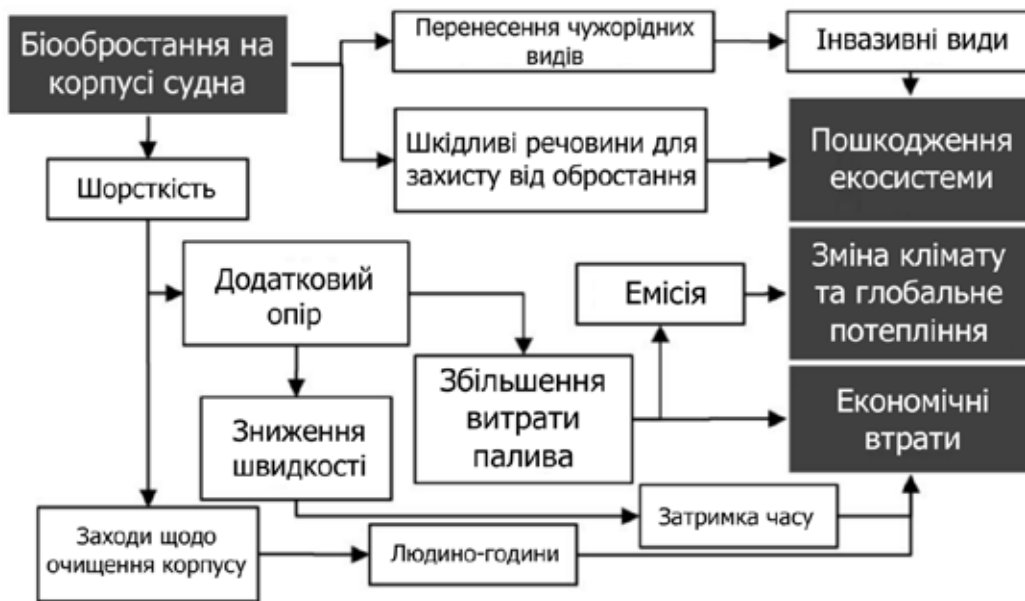


Рис. 1. Взаємозв'язок між проблемами, спричиненими біообростанням [3]

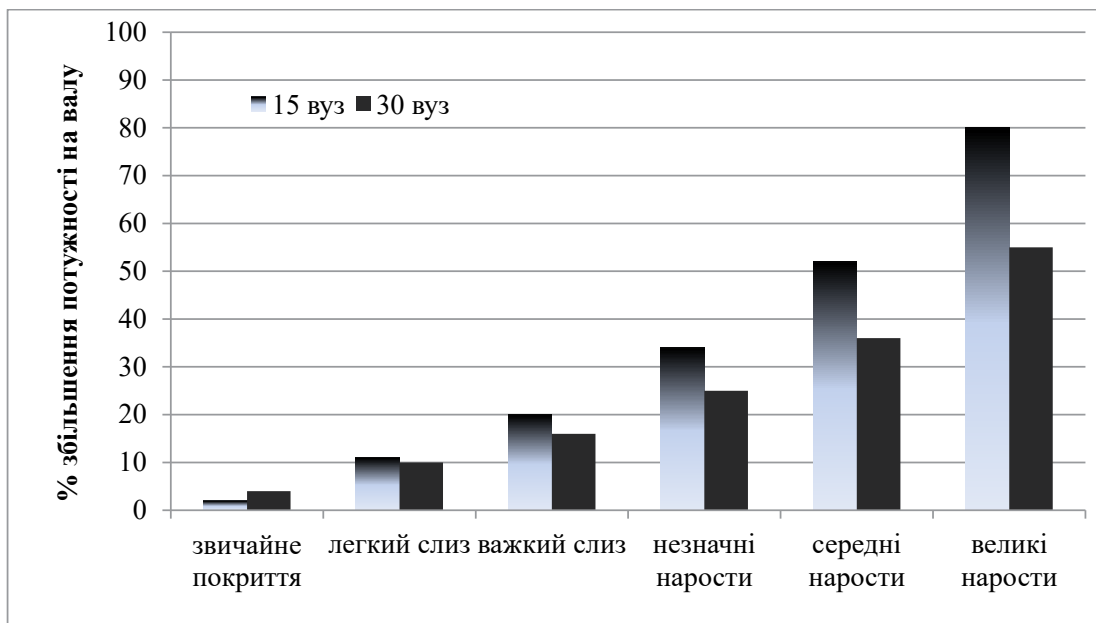


Рис. 2. Збільшення у відсотках необхідної потужності на валу під час руху судна на швидкості 15 та 30 вузлів за умов різного стану корпусу судна (на прикладі судна класу FFG-7) [5]

Біообростання корпусу судна негативно впливає на опір спокійній воді (рис. 3). Опір спокійній воді за умов середнього забруднення збільшується приблизно на 25% у порівнянні зі станом чистого корпусу, а при сильному забрудненні – більш як на 50% [6].

Відповідно до звіту Міжнародної морської організації «Про вплив біообростання суден на викиди парникових газів» опублікованому у лютому 2022 р., очищення корпусів суден від шару слизу завтовшки 0,5 мм, що покриває до 50% поверхні корпусу може знизити викиди парникових газів на судні від 20 до 25% залежно від характеристик судна, швидкості та інших переважуючих умов [7]. За умови очищення від середніх наростів – до 55% (на прикладі контейнеровозу середньої довжини). Загалом, звіт чітко показує, як сприятливий вплив біообростання недооцінювався судноплавною спільнотою.

Моніторингова компанія WE4SEA [8] продемонструвала приклад впливу очищення корпусу судна на щоденне споживання палива. Очищення корпусу судна знизило різницю між нормальним споживанням і фактичним з 10% до 0,2% (на прикладі моделі Digital Twin). Далі різниця збільшувалася приблизно на 1% кожного наступного місяця (рис. 4).

Отже, враховуючи безпосередній зв'язок між забрудненням корпусу та гвинта й споживанням мазуту, постало питання щодо проведення дослідження з планування маршруту руху судна, що підкреслює вплив забруднення та океанських течій на його оптимальний вибір. Оптимальне

планування маршруту в поєднанні зі станом забруднення корпусу та гвинта систематично перевірялося шляхом врахування спільного впливу забруднення корпусу та гвинта на морські течії [6]. Забруднення впливає на опір тертю, що є основним компонентом водонепроникності судна. Океанічні течії також позитивно чи негативно впливають на стійкість суден до спокійної води. Коли забруднення збільшується, процес планування маршруту надає перевагу маршрутам із позитивним впливом морських течій, особливо в більшій мірі, ніж коли рівень забруднення низький. Якщо в процесі планування маршруту знехтувати океанськими течіями, прогнозоване споживання мазуту буде відрізнятися від фактичного, і розрахункові оптимальні маршрути можуть бути неможливими в реальних морських умовах для необхідної швидкості. Це може призвести до набагато більшого споживання палива, ніж очікувалося, або до добровільної втрати швидкості [6].

Постановка завдання. Мета статті – провести аналіз впливу біообростання корпусу судна на динаміку руху судна.

Виклад основного матеріалу. Біологічне обростання є важливою проблемою в судноплавній промисловості, оскільки воно спричиняє збільшення шорсткості поверхні, що є причиною значного зниження швидкості судноплавства.

Питання припусків на шорсткість обговорювались на Міжнародній конференції буксирувальних танків (ITTC – the International Towing Tank Conference) ще у середині минулого століття [9].

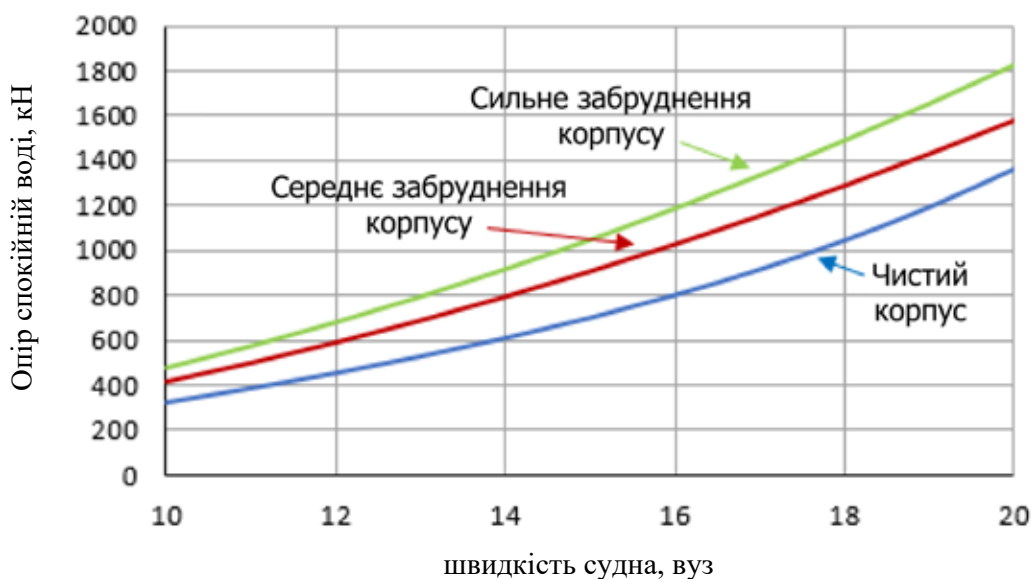


Рис. 3. Вплив забруднення на криві опору спокійній воді

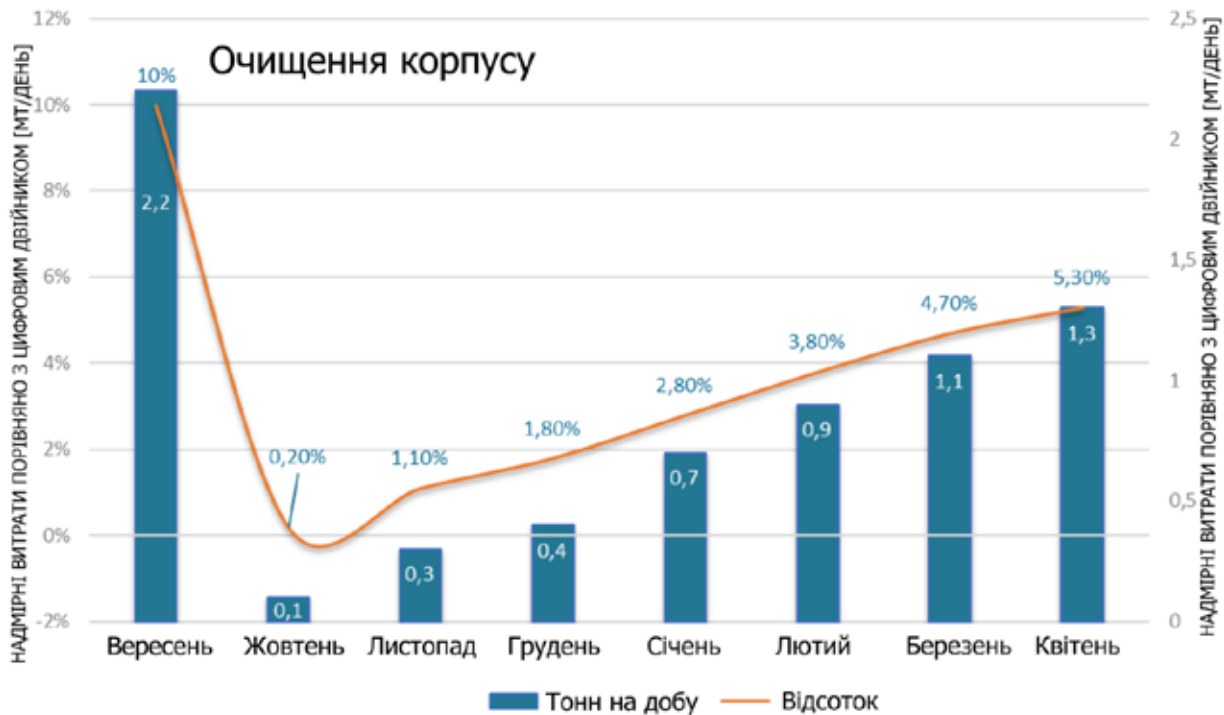


Рис. 4. Надмірні витрати порівняно з цифровим двійником

При цьому кореляційний допуск розраховувався за формулою:

$$\Delta C_F \times 10^3 = 105 \left(\frac{k_s}{L} \right)^3 - 0,64 \quad (1)$$

де k_s – середня шорсткість корпусу або середня видима амплітуда на межі 50 мм;

L – довжина судна, що не повинна перевищувати 400 м.

Оскільки на той час величину шорсткості корпусу для більшості суден було складно визначити, була прийнята величина стандартної амплітуди $k_s = 150 \cdot 10^{-6}$ м.

З часом вираз (1) набув змін. Формули, запропоновані Німено (2) й Townsin (3) були отримані з інтегральних методів 3-D граничного шару, включаючи залежність від числа Рейнольдса:

$$\Delta C_F = 0,0180 \times 10^{-3} \left(\frac{k_s}{L} \right) Re^{0,75} \quad (2)$$

$$\Delta C_F = 0,044 \left[\left(\frac{k_s}{L} \right)^3 - 10 Re^{-\frac{1}{3}} \right] + 0,000125 \quad (3)$$

де Re – число Рейнольдса.

М.Л. Хаким у своїй праці «Дослідження витрати палива на діючому судні через зростання біообростань та якості протиобростаючого покриття» наводить приклад залежності між кое-

фіцієнтом тертя та швидкістю судна [3]. Морські водорості та дрібні молюски можуть підвищувати опірність на 20–30%. Приймаємо максимальний коефіцієнт тертя $C_{F,max} = 30\%$. Підвищений опір через забруднення корпусу розраховується за формулою:

$$R_F(V) = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot S \cdot V^2 \cdot C_F(V) \quad (4)$$

де V – швидкість судна, м/с;

ρ – густина морської води, кг/м³;

S – площа змоченої поверхні корпусу судна, м².

Тут C_F розраховується на основі формули ІТТС, а потім множиться на 130%, де C_F є функцією числа Рейнольдса, поданого у виразі 6.

$$C_F(V) = \frac{0,075}{(\log_{10} Re(V) - 2)^2} \quad (5)$$

$$Re(V) = \frac{\rho \cdot L \cdot V}{\mu} \quad (6)$$

де μ – динамічна в'язкість морської води, Па·с.

Використовуючи (4), отримано графік залежності опору тертя від швидкості руху судна (рис. 5).

З аналізу випливає, що при тій же потужності нормального безперервного режиму (NCR – Normal Continuous Rating), швидкість спадає з 14 до 12 вузлів. Зниження швидкості впливає на збільшення часу плавання судна. У даному випадку

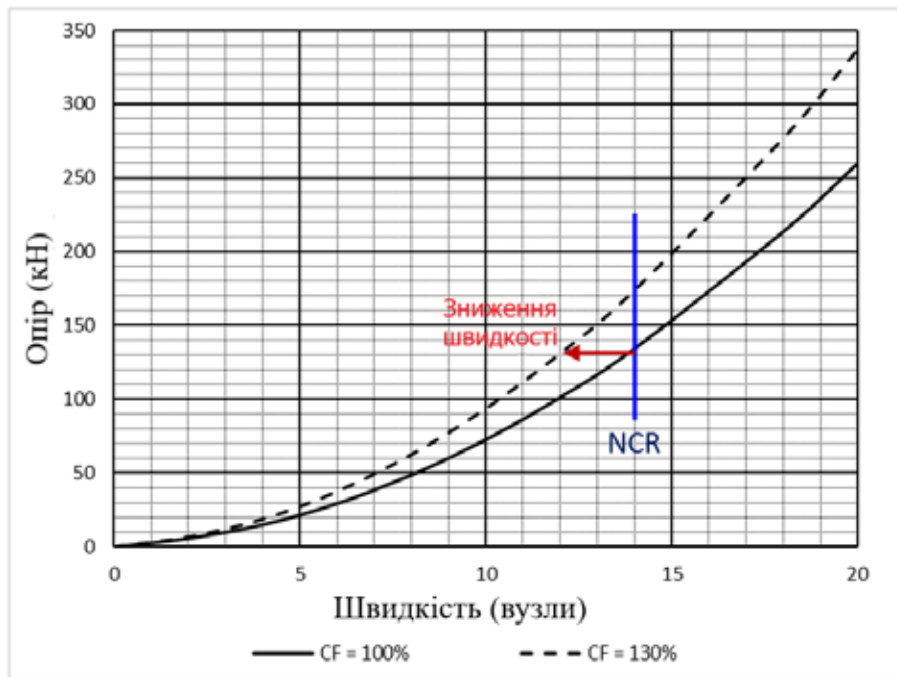


Рис. 5. Крива опору за рахунок збільшення C_F

час плавання збільшується на 16,7%, як і витрата палива.

У курсі дисципліни «Теоретична механіка» розглядається задача динаміки прямолінійного руху судна [10]. У задачі нехтують розмірами судна у порівнянні з відстанями, яке воно проходить, течією та вітром. За умови прямого положення руля судно здійснює горизонтальний прямолінійний рух, який описується диференціальним рівнянням:

$$(m + \lambda) \frac{d\vec{v}}{dt} = \vec{F} + \vec{R}, \quad (7)$$

де m – маса судна, кг;

λ – маса води, яка зумовлена дією в'язкості води на занурену частину корпусу, коли судно рухається (у модельних задачах $\lambda = 0,1m$), кг;

F – сила тяги двигуна, Н;

R – сила опору руху, $(\text{кг}\cdot\text{м})/\text{с}^2$.

Обтікання судна при характерних експлуатаційних значеннях швидкості супроводжується виникненням турбулентного потоку, то сила опору водного середовища пропорційна квадрату швидкості:

$$R = -\alpha v^2, \quad (8)$$

де α – коефіцієнт опору водного середовища, який залежить від завантаження судна, форми зануреної частини корпусу та його стану (тобто ступеню біообростання), а знак « \leftarrow » вказує, що ця сила спрямована завжди проти швидкості руху судна, $\text{кг}/\text{м}$.

Для спрощення формул, введемо $m_e = 1,1m$ – ефективну масу судна, тоді рівняння (7) з врахуванням (8) в проекції на вісь x , що спрямовують за напрямом руху судна, приймає вигляд:

$$m_e \frac{dv}{dt} = \pm |F| - \alpha v^2. \quad (9)$$

Рівняння (9) доповнюють початковими умовами (для зручності враховується, що відлік координати співпадає з початковим положенням судна): при $t = 0$, $x_0 = 0$, $v = v_0$. Кожному значенню сили тяги $F > 0$ відповідає перехідний процес зміни швидкості ($dv/dt \neq 0$), що закінчується досягненням усталеного значення швидкості v_y :

$$v_y = \sqrt{F / \alpha}. \quad (10)$$

Після виконання ряду перетворень отримано рівняння

$$t = m_e \int_{v_0}^v \frac{dv'}{\pm |F| - \alpha (v')^2}, \quad (11)$$

що дозволяє знаходити час як функцію швидкості $t(v)$, або (після відповідних алгебраїчних перетворень) визначати швидкість судна як функцію часу $v(t)$.

Для визначення шляху, який проходить судно, можна скористатися інтегруванням $v(t)$, але простіше застосувати перетворення

$$\frac{dv}{dt} = \frac{dv}{dx} \cdot \frac{dx}{dt} = v \cdot \frac{dv}{dx}.$$

Тоді зрівняння (9) отримуємо $dx = m_e \frac{v dv}{\pm |F| - \alpha v^2}$,

що за початковими умовами ($t = 0$, $x_0 = 0$, $v = v_0$), дозволяє визначити шлях S , який проходить судно в процесі зміни швидкості від початкової v_0 до поточного значення v

$$\int_0^S dx = S = m_e \int_{v_0}^v \frac{v' dv'}{\pm |F| - \alpha (v')^2}, \quad (12)$$

і таким чином визначити шлях як складну функцію часу $S(v(t))$.

Наведені методики розрахунків можна використовувати для порівняльного аналізу зміни швидкості та пройденого шляху судном в залежності від ступеню біообростання.

Висновки. Біообростання підводної частини корпусу судна відноситься до найбільш складних та важких явищ. Воно призводить до зниження швидкості руху судна. Шорсткість, спричинена біообростанням, підвищує опір судна, що призводить до збільшення потреб у потуж-

ності та пальному. Дані компанії WE4SEA [8] підтверджують позитивний вплив очищення корпусу судна на ефективність руху. Додатково, висвітлено зростання вихідної потужності, яка перевищує приріст дієвої потужності через наявність твердих обростань. Форма підводної частини корпусу судна суттєво впливає на параметри, що характеризують ефективність його рушійної системи, зокрема, накопичення шару біоплівки може призвести до значного зниження швидкості плавання (приблизно на 25%). Рекомендовано регулярно проводити очищення корпусу судна та гребного гвинта для зменшення біообростання, підтримання оптимальної ефективності руху та зменшення викидів забруднюючих речовин. Також рекомендується враховувати вплив біообростання на ходові якості судна при проведенні діагностики судна, що може стати основою для судовласника при прийнятті рішення про економічну доцільність експлуатації судна з великими інтервалами часу між послідовними доками.

Список літератури:

1. Haoyi Qiu, Kang Feng, Anna Gapeeva, Kerstin Meurisch, Sören Kaps, Xia Li, Liangmin Yu, Yogendra Kumar Mishra, Rainer Adelung, Martina Baum. Functional polymer materials for modern marine biofouling control. *Progress in Polymer Science*. Volume 127, April 2022, 101516. URL: <https://doi.org/10.1016/j.progpolymsci.2022.101516>
2. Report to the marine environment protection committee : sub-committee on pollution of 26.04.2022. <https://iadc.org/wp-content/uploads/2022/05/PPR-9-21-Report-To-The-Marine-Environment-Protection-Committee-Secretariat.pdf> (дата звернення: 19.03.2024).
3. Hakim M. L. Investigation of fuel consumption on an operating ship due to biofouling growth and quality of antifouling coating. MARINE SCIENCE AND TECHNOLOGY. MALUKU INTERNATIONAL CONFERENCE., Maluku, 24–26 October 2018. P. 458. URL: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1755-1315/339/1/012037/pdf> (дата звернення: 21.03.2024).
4. Roberts D, Rittschof D, Holm E, Schmidt A.R. Factors influencing initial larval settlement: temporal, spatial and surface molecular components. *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology*. Volume 150, Issue 2, 9 August 1991, Pages 203–221. URL: [https://doi.org/10.1016/0022-0981\(91\)90068-8](https://doi.org/10.1016/0022-0981(91)90068-8)
5. Schultz, Michael P. Assessing the Hydrodynamic Performance of Fouling-Release Surfaces. 2007. URL: <https://apps.dtic.mil/sti/pdfs/ADA520374.pdf> (дата звернення: 09.03.2024).
6. Kytariolou A, Themelis N. Optimized Route Planning under the Effect of Hull and Propeller Fouling and Considering Ocean Currents. *Journal of Marine Science and Engineering*. 2023; 11(4):828. <https://doi.org/10.3390/jmse11040828>
7. International Maritime Organization, GloFouling Partnerships. Preliminary results Impact of Ships' Biofouling on Greenhouse Gas Emissions. 2022. 5 p. URL: <https://www.wcdn.imo.org/localresources/en/MediaCentre/Documents/Biofouling%20report.pdf> (дата звернення: 14.03.2024).
8. The effect of a hull cleaning – and how to measure it. We4Sea. URL: <https://www.we4sea.com/blog/the-effect-of-a-hull-cleaning-and-how-to-measure-it> (дата звернення: 12.03.2024).
9. The Specialist Committee on Powering Performance Prediction. Final Report and Recommendations to the 25th ITTC. Fukuoka, 2008. P. 417–420. URL: https://ittc.info/media/3485/volume2_1powering_perf_pred.pdf (дата звернення: 19.03.2024).
10. Козицький С.В. Теоретична механіка у задачах та прикладах: навчальний посібник / С. В. Козицький, О. С. Григор'єва – Одеса: НУ «ОМА», 2020. – 189 с.

Bykovets N.P. ANALYSIS OF THE INFLUENCE OF SHIP HULL BIOFOULING ON SHIP'S DYNAMIC MOTION

One of the most important issues concerning technical objects is the increase in their operating performance. For a ship, this performance mainly depends on the efficiency of its main propulsion system and the resistance generated during its motion. Due to the importance of energy efficiency and emission reduction in shipping, a number of numerical models have been developed to assess ship performance. Such models include various components, e.g. calm water resistance. The overall ship resistance, in turn, mainly depends on the hull friction resistance because of the presence of various types of roughness on the hull surface, including biofouling of its underwater part. Biofouling and marine pollution pose substantial challenges to the maritime industry, prompting extensive research efforts to identify effective solutions. The article analyzes the influence of ship hull biofouling on certain parameters characterizing the efficiency of a ship's motion. In particular, the extension of a biofouling layer, when micro- and macro-organisms accumulate on the ship's surface, leads to a significant reduction in shipping speed. The speed reduction increases the vessel's sailing time and fuel consumption. The International Maritime Organization recognizes that uncoordinated biofouling prevention and underwater cleaning policies pose serious challenges to the shipping industry. Cleaning ship hulls from a layer of slime of varying thickness, covering up to 50% of the hull surface, can reduce greenhouse gas emissions on board a ship by 20 to 55%, depending on the ship's characteristics, speed, and other prevailing conditions. The analysis of the dependence of friction resistance on the ship's speed is carried out. A method for solving the problem of a ship's dynamic route is demonstrated. The above-stated calculation methods can be used to perform a comparative analysis of changes in speed and distance sailed by a ship depending on the degree of biofouling.

Key words: biofouling, roughness of the hull surface, resistance, speed, pollution.

Бондаренко Ю.А.

Одеський національний морський університет

СТРУКТУРА ТА ПАРАМЕТРИ СИСТЕМИ МОРСЬКИХ КОНТЕЙНЕРНИХ ПЕРЕВЕЗЕНЬ КОМПАНІЇ-ПЕРЕВІЗНИКА

Управління роботою флоту компанії лінійного перевізника передбачає рішення як стратегічного характеру, так і оперативного, ґрунтуючись на системі відповідних техніко-експлуатаційних та економічних показників. Дані показники мають відображати не тільки результати роботи окремих суден, а функціонування лінійного сервісу в цілому, що базується на відповідній системі параметрів, які можуть бути використані, з одного боку, для аналізу поточної ситуації, з іншого боку, для прогнозів та оптимізації даних параметрів для заданих умов.

У даному дослідженні запропоновано формалізований опис структури та параметрів системи морських контейнерних перевезень компанії-перевізника, як сукупності відповідних підсистем лінійних сервісів. Для підсистеми «лінійний сервіс» основними елементами є: «порти», «судна», «контейнеропотоки», а розклад та тарифи – це додаткові елементи, що відображають умови, за якими здійснюється транспортний процес для власників вантажу, «канали (протоки)» – елементи, що відображають географію маршруту сервісу та впливають на нього з точки зору витрат. Для кожного елемента сформовано відповідну множину параметрів, які у сукупності описують систему морських контейнерних перевезень компанії-перевізника. Параметри елементів лінії визначають результати роботи суден і функціонування лінійного сервісу в цілому. Результати оцінюються техніко-експлуатаційними та економічними показниками. Запропоновано дворівневий підхід до оцінки результатів роботи суден: перший рівень – рівень роботи конкретного судна; другий рівень – рівень функціонування лінійного контейнерного сервісу. Запропоновано підхід до визначення двох типів показників для оцінки функціонування лінійного сервісу, що передбачає, зокрема, враховувати контейнеромісткість суден для формування відносних показників (коефіцієнт використання контейнеромісткості, тайм-чартерний еквівалент). Подальшим розвитком зазначених результатів є формування оптимізаційних моделей для визначення оптимальних параметрів лінійних сервісів.

Ключові слова: контейнерні перевезення, лінійний сервіс, ефективність, робота суден, техніко-експлуатаційні показники.

Постановка проблеми. Контейнерні перевезення займають вагомий частку у структурі морських перевезень, і подальше зростання обсягів світової торгівлі призводить до відповідного зростання кількості суден-контейнеровозів у складі світового флоту та різноманітності лінійних сервісів, які пов'язані з роботою, як правило, кількох суден на певному маршруті за встановленим розкладом. Сучасні гігантські компанії лінійних перевізників, такі як MSC, Maersk, CMA-CGM, Evergreen розпоряджаються флотом, який налічує 600–700 суден, а флот відносно невеликих компаній також становить до 50–100 одиниць. Дані судна працюють на множині різноманітних з точки зору географії та протяжності ліній, причому попит на перевезення може не просто коливатися, а змінюватися принципово з урахуванням глобальних змін у світовій торгівлі. Таким чином, йдеться про цілу систему морських контейнерних перевезень для кожної компанії-перевізника,

в рамках якої множина суден розподілена серед множини лінійних сервісів (ліній), та на роботу цих суден впливає система відповідних факторів – попиту на морські перевезення, доступність окремих портів, вартість судового палива тощо.

Управління роботою флоту компанії лінійного перевізника передбачає рішення як стратегічного характеру, так і оперативного, ґрунтуючись на системі відповідних техніко-експлуатаційних та економічних показників. Дані показники мають відображати не просто результати роботи окремих суден, а функціонування лінійного сервісу в цілому, що базується на відповідній системі параметрів, які можуть бути використані, з одного боку, для аналізу поточної ситуації, з іншого боку, для прогнозів та оптимізації даних параметрів для заданих умов. До рішень, пов'язаних з оптимізацією параметрів системи морських перевезень, наприклад, відноситься перерозподіл суден на різних лінійних сервісах, зміна структури ліній

з точки зору складу портів тощо, що є актуальним для компаній-перевізників в умовах мінливої ситуації на ринку морських контейнерних перевезень.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. З урахуванням значимості морських контейнерних перевезень та постійної зміни умов роботи компаній лінійних перевізників, які стикаються з новими глобальними викликами, багато дослідників звертаються до проблеми роботи суден-контейнеровозів на лініях. Теоретичний базис роботи суден у контейнерній транспортно-технологічній системі наданий у роботах [1,2], де, наприклад, обґрунтовані умови доцільності заходу судна у факультативні порти та умови економічно-доцільного завантаження судна.

Комплекс відповідних завдань, які розглядаються у сучасній літературі, досить широкий, але він може бути розподілений на більш глобальні напрями. Так, важливою проблемою є функціонування магістрально-фідерного сполучення, що було предметом дослідження у [3–5]. У цих роботах увага зосереджена на параметрах контейнеропотоків та їх оптимальному розподілу у межах системи магістрально-фідерної лінії. Слід зазначити, що в [3] акцент зроблено на оптимізації розподілу контейнеропотоків за існуючої магістрально-фідерної системи із заданими характеристиками суден, що працюють у даній системі. У [4] увагу приділено вивезення порожніх контейнерів у структурі контейнеропотоків та їхнього розподілу між суднами. Вплив зміни обсягу контейнеропотоків магістральної лінії на функціонування фідерного сервісу розглянуто в [5]. Проблемі оптимізації вивезення порожніх контейнерів у рамках лінійного сервісу присвячені також роботи [6,7].

Другим напрямом у рамках досліджень роботи суден-контейнеровозів та функціонування лінійних сервісів є проблема формування маршрутів та відповідного розкладу роботи суден. Цим питанням присвячені роботи [8–10]. У [8] розглядаються можливі варіанти структури ліній з погляду глобальних складових – Європа, Азія, Америка, а також принципи формування магістрально-фідерних ліній. Робота [9] спрямовано на врахування особливостей портів заходу для формування ліній. У [10] вирішуються завдання з управління роботою суден у рамках конкретної лінії на оперативному рівні (автори розглядають проміжок часу 3–6 місяців), а саме, перегляд портів заходу, розкладу та оптимізація швидкості судна на переходах між портами. Окремі питання

оптимізації розкладу роботи суден, у тому числі з урахуванням невизначеності, розглядалися у роботах [11–14].

Як раніше вже згадувалося, формалізація системи морських перевезень компаній перевізників та її параметрів є необхідним теоретичним базисом для оптимізації: складу флоту, розподілу та перерозподілу флоту, складу лінійних сервісів тощо. Слід зазначити, що з проблемою розподілу суден пов'язано достатня кількість робіт, наприклад, [15–18]. У цих роботах пропонувалися рішення щодо суден за різних комерційних умов: для довгострокових контрактів з урахуванням їхньої специфіки [15,16], а також при обслуговуванні вантажопотоків на умовах рейсового чартеру з урахуванням невизначеності основних факторів впливу [17,18]. Тим не менш, дані роботи орієнтовані на судна-балкери та специфіку їх роботи, тому представлені результати потребують адаптації до умов роботи ліній, як й відповідні структура системи та параметри, які було прийнято.

Що стосується формалізації системи морських контейнерних перевезень та її параметрів, то слід зазначити роботи [3] та [19], які в рамках розглянутих завдань досить добре описали і систему [3], магістрально-фідерну, і параметри [19] контейнерних перевезень, але ці результати орієнтовані на конкретні завдання та враховують лише той склад елементів та параметрів, який актуальний для них.

Таким чином, для побудови теоретичного фундаменту для подальшого дослідження рішень, пов'язаних з роботою флоту на сукупності лінійних сервісів, необхідна формалізація системи морських перевезень компанії-перевізника, що є предметом даного дослідження.

Постановка завдання. Таким чином, метою даного дослідження є встановлення та формалізація структури та параметрів системи морських контейнерних перевезень компанії-перевізника як теоретичної бази для подальших досліджень питань забезпечення та підвищення ефективності процесів управління роботою суден-контейнеровозів на лініях. Мета дослідження обумовлює рішення наступних завдань:

- 1) визначення структури та формалізований опис складових системи морських контейнерних перевезень компанії-перевізника;
- 2) визначення основних параметрів елементів контейнерного лінійного сервісу;
- 3) формування дворівневого підходу до оцінки результатів роботи суден на лініях.

Виклад основного матеріалу.

Система морських контейнерних перевезень компанії-перевізника

Отже, система морських контейнерних перевезень компанії-перевізника представлена схемою на рис. 1. Основними елементами даної системи є «лінії» та «судна», які на них працюють. Зазначимо, що саме ці елементи є «керованими» з точки зору судноплавної компанії. Причому управлінню підлягають як загальна кількість суден, що працюють, та розподіл суден, так і їх характеристики. Також управлінню підлягає набір портів кожної лінії, а також сукупність лінійних сервісів. Зазначимо, що «контейнеропотоки» є також невід'ємною частиною системи морських перевезень компанії-перевізника, але, на відміну від ліній та суден, підлягають «управлінню» лише частково. Природно, що конкурентна політика компанії та робота з клієнтами формують вплив на контейнеропотоки та дозволяють впливати на

них на користь перевізника. Але при, наприклад, ситуаціях політичного характеру, або таких як війна в Україні, коли порти та цілий регіон є недоступними для роботи, вплинути на контейнеропотоки компанія-перевізнак не в змозі.

Кожна лінія $LS_n, n = \overline{1, N}$, у свою чергу, включає множину портів $\Pi_n = \{\Pi_{n1}, \Pi_{n2}, \dots, \Pi_{nv_n}\}$ та множину суден $S_n = \{S_{n1}, S_{n2}, \dots, S_{n\gamma_n}\}$, які «прив'язані» до лінії та працюють за певним розкладом $R_n = \{R_{n1}, R_{n2}, \dots, R_{n\gamma_n}\}$. Зазначимо, що кожен елемент множини R_n відображає графік роботи відповідного судна – час приходу та відходу в/з кожного порту лінії.

Π_{nv} – порт лінії, $n = \overline{1, N}, v = \overline{1, v_n}, v_n$ – кількість портів цієї лінії; $S_{n\gamma}$ – судно, яке працює на лінії; $n = \overline{1, N}, \gamma = \overline{1, \gamma_n}, \gamma_n$ – кількість суден, що працюють на даній лінії; $\Gamma = \sum_{n=1}^N \gamma_n$ – загальна кількість суден компанії, що працюють на лініях;

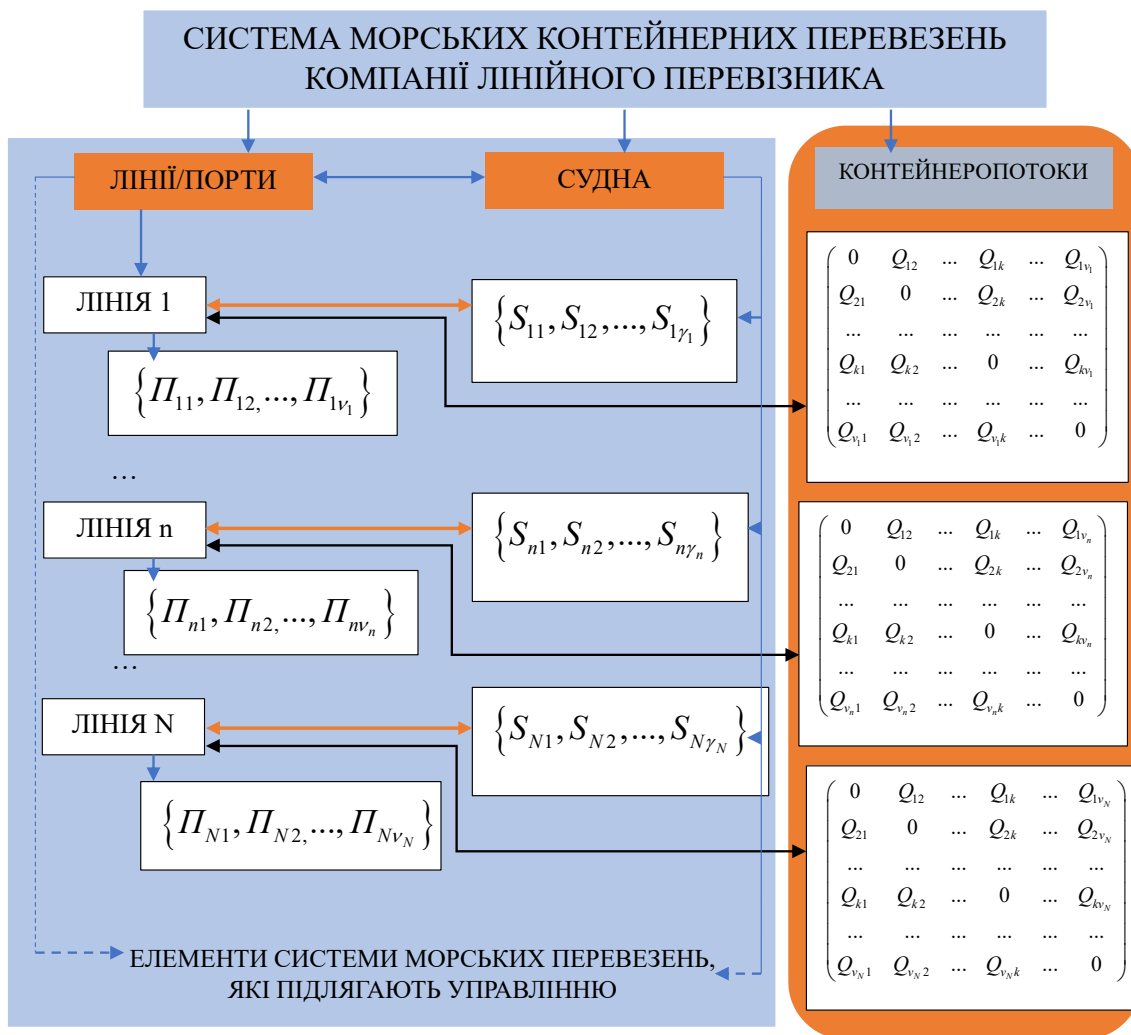


Рис. 1. Система морських перевезень грузів в контейнерах компанії-перевізника

$\Omega_s = \bigcup_{n=1}^N \bigcup_{\gamma=1}^{\gamma_n} S_{n\gamma}$ – множина суден компанії, які працюють на лініях.

Зазначимо, що уточнення для суден компанії – «працюючих на лініях» – не випадкове. Судноплавна компанія може володіти й іншими судами, які з погляду комерційної доцільності можуть бути здані в тайм-чартерну оренду. У свою чергу, компанія може брати в тайм-чартерну оренду судна з тими характеристиками, які є найбільш відповідними з точки зору роботи на конкретній лінії у певний проміжок часу. Так, наприклад, зменшення вантажної бази (контейнеропотоків) на конкретному напрямку може призвести до необхідності використання судна меншої контейнероємності, тоді як судно більшої контейнероємності, якщо немає можливості його використовувати на інших лініях, здати в тайм-чартерну оренду.

Контейнеропотоки кожної лінії характеризуються обсягами між конкретними портами лінії $Q_{v_n,k}, n = \overline{1, N}, k = \overline{1, v_n}$, формуя матрицю $Q_n, n = \overline{1, N}$ виду:

$$Q_n = \begin{pmatrix} 0 & Q_{12} & \dots & Q_{1k} & \dots & Q_{1v_n} \\ Q_{21} & 0 & \dots & Q_{2k} & \dots & Q_{2v_n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ Q_{k1} & Q_{k2} & \dots & 0 & \dots & Q_{kv_n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ Q_{v_n,1} & Q_{v_n,2} & \dots & Q_{v_n,k} & \dots & 0 \end{pmatrix}, n = \overline{1, N} \quad (1)$$

Таким чином, система морських перевезень компанії-перевізника складається з множини підсистем – лінійних сервісів, які включають набір портів і суден з відповідним розкладом. Утворюючими одиницями системи морських перевезень на цьому рівні є порти, судна і контейнеропотоки. Отже, кожен лінійний сервіс компанії-перевізника (підсистема системи морських перевезень) може бути описаний наступним набором – порти P_n , судна S_n , канали (протоки) H_n , контейнеропотоки, розклад R_n , тарифи C_n :

$$LS_n = \langle P_n, H_n, S_n, Q_n, R_n, C_n \rangle, n = \overline{1, N}, \quad (2)$$

де P_n, S_n, Q_n, R_n уявляють собою множини портів, суден, величин контейнеропотоків між портами та розклад роботи суден;

$$H_n = \{H_{n1}, \dots, H_{n\psi_n}\}, n = \overline{1, N} \quad (3)$$

– множина каналів, протоків або інших інфраструктурних об'єктів у процесі прямування судном морського шляху в рамках маршруту лінії, за які стягується плата – наприклад, Панамський

канал, Суецький канал, Босфор і Дарданелли і т.д. ψ_n – кількість даних об'єктів в рамках маршруту лінії $n = \overline{1, N}$;

C_n – матриця цін (тарифів) для перевезення одного контейнера між портами лінії. Фактично, з урахуванням того, що перевезенню підлягають різні види контейнерів, то елементи цієї матриці є векторними величинами, розмірність яких відповідають кількості видів контейнерів, що підлягають перевезенню (наприклад, 20 футовий контейнер, 40 футовий контейнер, рефконтейнер тощо). Але, не обмежуючи загальності, в даному випадку розглядатимемо найпростіший варіант матриці – тільки для 20 футового контейнера:

$$C_n = \begin{pmatrix} 0 & C_{12} & \dots & C_{1k} & \dots & C_{1v_n} \\ C_{21} & 0 & \dots & C_{2k} & \dots & C_{2v_n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ C_{k1} & C_{k2} & \dots & 0 & \dots & Q_{kv_n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ C_{v_n,1} & C_{v_n,2} & \dots & C_{v_n,k} & \dots & 0 \end{pmatrix}, n = \overline{1, N}. \quad (4)$$

Сукупність всіх лінійних сервісів компанії-перевізника формує, як згадувалося вище, його систему морських перевезень, математично це може бути описано наступним чином:

$$L = \bigcup_{n=1}^N LS_n. \quad (5)$$

Q_n є екзогенними величинами, на відміну від інших складових LS_n .

Параметри основних елементів контейнерного лінійного сервісу

Як відомо, кожна система (підсистема) характеризується набором параметрів. Зазначимо, що згідно з прийнятим підходом, параметр – властивість чи показник об'єкта чи системи, яку можна виміряти; результатом вимірювання параметра системи є число чи величина параметра, а саму систему можна розглядати як множину параметрів, яку дослідник вважав за необхідне виміряти для моделювання її поведінки. Іншими словами, параметр – це узагальнена назва певної властивості системи/процесу. Утворюючими одиницями системи морських перевезень на цьому рівні є порти, судна і контейнеропотоки, які можна описати наборами показників, які, власне, і формують параметри кожного лінійного сервісу (підсистеми системи морських перевезень). Деталізація цих наборів залежить від розв'язуваних завдань. Таким чином, для підсистеми «лінійний сервіс» системи морських перевезень основними елементами є: «порти», «судна», «контейнеропотоки»,

а розклад та тарифи – це додаткові елементи, що відображають умови, за якими здійснюється транспортний процес для власників вантажу, «канали (протоки)» – елементи, що відображають географію маршруту сервісу та впливають на нього з погляду витрат.

Елемент «судна». Мінімально необхідний набір для управління роботою суден у даній системі для елемента судна пропонується наступний:

$$S_{ny} = \langle K_{ny}, NT_{ny}, BT_{ny}, r_{ny}, r_{ny}^{bunk_v}, r_{ny}^{bunk_p} \rangle, n = \overline{1, N}, \gamma = \overline{1, \gamma_n}, (6)$$

де K_{ny} – контейнеромісткість судна, TEU; NT_{ny} , BT_{ny} – відповідно, нетто- та брутто-тоннаж судна (паспортні характеристики), які визначають важливу складову витрат по судну – портові збори та плати, а також вартість проходження каналів та проток (Босфор, Дарданелли); r_{ny} – норматив постійних витрат по судну, дол/доб; $r_{ny}^{bunk_v}$ – витрати палива на ходу (для усередненої швидкості), т/доб; $r_{ny}^{bunk_p}$ – витрати палива на стоянці, т/доб;

Усі зазначені параметри елемента лінійного сервісу «судно» фактично умовно-постійними величинами і відбивають характеристики судна без прив'язки до лінії. Так, добові витраті палива $r_{ny}^{bunk_v}$ та $r_{ny}^{bunk_p}$ залежать тільки від судна (його головної енергетичної установки, допоміжних двигунів, віку судна та технічного стану двигунів судна). Норматив постійних витрат r_{ny} розглядається тільки для власних суден перевізника, якщо конкретне судно, що розглядається, є орендованим у тайм-чартер, то в цьому випадку (6) трансформується в:

$$S_{ny} = \langle K_{ny}, NT_{ny}, BT_{ny}, f_{ny}^{t-ch}, r_{ny}^{bunk_v}, r_{ny}^{bunk_p} \rangle, n = \overline{1, N}, \gamma = \overline{1, \gamma_n}, (7)$$

де f_{ny}^{t-ch} – ставка тайм-чартерної оренди судна.

Тільки об'єднання параметрів певних суден та інших складових лінійного сервісу формують результати роботи суден, які пізніше будуть визначені як параметри системи «лінійний сервіс».

Елемент «порти». Для елемента лінійного сервісу «порти» $\Pi_n = \{ \Pi_{n1}, \Pi_{n2}, \dots, \Pi_{nv_n} \}$ пропонується такі параметри $r_{nk}^{port_NT}$, $r_{nk}^{port_BT}$, r_{nk}^{port} , які відображають вартість перебування судна в порту для 1 NT та 1 BT, відповідно, оскільки, як правило, портові збори та плати нараховуються саме на NT та BT судна):

$$\Pi_{nk} = \langle r_{nk}^{port_NT}, r_{nk}^{port_BT} \rangle, k = \overline{1, v_n}, n = \overline{1, N}. (8)$$

Елемент «Канали (протоки)». Як і у випадку з портами, для даного елемента використовуємо параметри h_{ng}^{NT} , h_{ng}^{BT} , які характеризують вартість 1 NT і 1 BT проходження судном каналу або про-

токи (або іншого інфраструктурного об'єкта на маршруті прямування):

$$H_{ng} = \langle h_{ng}^{NT}, h_{ng}^{BT} \rangle, g = \overline{1, \psi_n}, n = \overline{1, N}. (9)$$

Елемент «контейнеропотоки». Що ж до контейнеропотоків, то тут слід зазначити таке. Зміни у структурі лінії, тобто набору портів, а також у кількості суден, призводять до зміни частоти заходу суден у порти та відповідного розкладу їх роботи. Ключовим чинником тут є попит, тому логічний ланцюжок: «контейнеропотоки» – «порти»+судна – «розклад»+ «тарифи» формує етапність прийняття рішень щодо функціонування лінії та роботи суден. Проте, тут слід зауважити – у деяких ситуаціях компанії-перевізники відкривають лінійний сервіс, орієнтуючись виключно не на існуючий, а на потенційний попит. Наприклад, якщо йдеться про порти з контейнерними терміналами Китаю або Північної Європи, то в даному випадку попит є реальним і прогнозованим (на перспективу). Але якщо розглядаються, наприклад, практично неконтейнеризовані порти, то компанії-перевізники можуть інвестувати (і це відбувається) у будівництво терміналів (як єдині інвестори або з партнерами) і відкривають контейнерний сервіс, по суті, на «порожньому місці», інтенсифікуючи таким чином процес контейнеризації регіону. Такими прикладами можуть бути лінії, які працюють із деякими портами в Африці. У цьому випадку виникає інший логічний ланцюжок: "порти" + "судна" – "розклад" + "тарифи" – "контейнеропотоки".

1) У першій ситуації доступна інформація про минулі величини контейнеропотоків та прогнози традиційної вантажної бази, що дає можливість оцінити параметри закону розподілу випадкової величини – обсягів контейнеропотоків. Як мінімальний набір параметрів елемента $Q_{lk}, l, k = \overline{1, v_n}; n = \overline{1, N}$, «контейнеропотоки» в этом случае предлагается следующий:

$$Q_{lk} = \langle \bar{Q}_{lk}, \sigma_{Q_{lk}} \rangle, k, l = \overline{1, v_n}, n = \overline{1, N}, (10)$$

де \bar{Q}_{lk} – середнє значення (математичне очікування) контейнеропотоку між портами $l, k = \overline{1, v_n}; n = \overline{1, N}$ - що може бути прийнято як річна величина, або середня кількість контейнерів на місяць,

$\sigma_{Q_{lk}}$ – середньоквадратичне відхилення контейнеропотоків між портами $l, k = \overline{1, v_n}; n = \overline{1, N}$ - відповідно, або на рік, або на місяць.

Ці параметри відображають невизначеність контейнеропотоків. У джерелах, у яких наводилися результати дослідження невизначеності

вантажопотоків, наприклад, [19–22], зазначено, що з урахуванням того, що контейнеропотоки можуть бути розглянуті як безперервні величини: по-перше, як правило, оперують обсягами контейнеропотоків не в TEU, а в тис. TEU, Звідки і виникають практично безперервні за своєю природою величини (12,567 тис. TEU, або 218,350 тис. TEU); по-друге, у багатьох статистичних звітах наводяться обсяги контейнеропотоків не в TEU, а тис.т, таким чином, обсяги контейнеропотоків наводяться формою до обсягів вантажопотоку, які за своєю природою є безперервними величинами. Отже, не обмежуючи спільності, можна вважати, що обсяги контейнеропотоків є безперервними величинами, які підпорядковуються нормальному закону розподілу з параметрами $\bar{Q}_{lk}, \sigma^2_{Q_{lk}}$. «Нормальність» контейнеропотоків та вантажопотоків досліджувалася, зокрема, у [19].

2) У другій ситуації, коли відсутня або недостатня статистика про «повідінку» контейнеро-

потоків, або характер ситуації такий, що можна оцінити тільки окремі можливі варіанти, то закон розподілу може бути сформульований на підставі думок експертів. Тоді набір параметрів, що характеризують елемент «контейнеропотоки» буде наступним:

$$Q_{lk} = \langle (Q^m_{lk}, p^m_{lk}), m = \overline{1, M}, k, l = \overline{1, v_n}, n = \overline{1, N} \rangle, \quad (11)$$

де пари (Q^m_{lk}, p^m_{lk}) відображають можливе значення контейнеропотока і його ймовірність.

Так, основні параметри системи «лінійний контейнерний сервіс» – підсистеми системи морських контейнерних перевезень компанії-перевізника можуть бути узагальнені у вигляді схеми на рис. 2.

Слід відзначити, що відповідно до встановленого вище, множина, що характеризує лінійний контейнерний сервіс компанії-перевізника, включає в себе також розклад і тарифи, які не включені в дану схему (рис. 2), як додаткові елементи зазна-

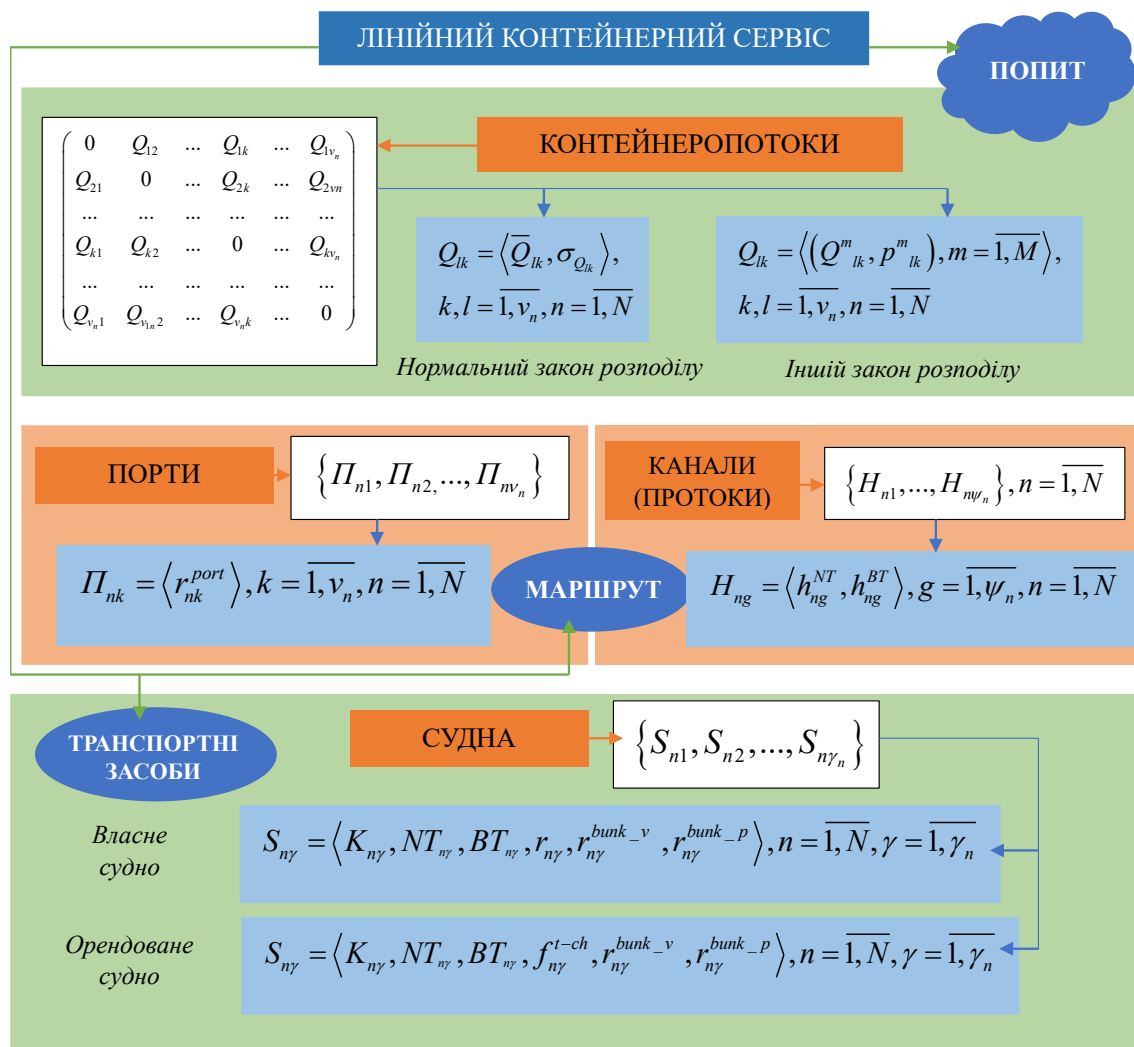


Рис. 2. Параметри основних елементів контейнерного лінійного сервісу

ченої множини. Тем не менше, це є параметри, які необхідні для оцінки результатів роботи суден. Розклад пропонується охарактеризувати параметрами:

$$\langle T_{n1}, T_{n2}, \dots, T_{n\gamma_n} \rangle, n = \overline{1, N}, \quad (12)$$

які відображають тривалість кругових рейсів кожного судна, що працює на лінії. Дані тривалості служать основою для визначення кількості рейсів у розглянутий період часу та оцінки річної, наприклад, ефективності роботи суден. Безпосередньо тривалість рейсів дозволяє оцінити добову ефективність роботи суден, прийняту в судноплавстві – тайм-чартерний еквівалент.

Відзначимо, що з представленої сукупності параметрів варіюванню (з точки зору перевізника) підлягають вони всі:

- «судно» може бути замінено на більше або менше по контейнеромісткості;
- «порти» можуть бути виключені або включені до складу лінії, що призводить до зміни «розкладу»;
- зміни «тарифів», зумовлені ринковою/конкурентною ситуацією або змінами в собівартості перевозок під впливом, перш за все, ринкових факторів (наприклад, вартості судового палива або удорожчання судозаходів).

«Контейнеропотоки» при цьому є основополагаючим і основним впливовим елементом, тому що саме зміни параметрів контейнеропотоків приводять до необхідності зміни структури та параметрів контейнерної лінії. Структура лінії – це складові елементи: порти і судна, параметри – характеристики суден і портів, а також інших взаємозв'язаних з лінією елементів (каналів (проток), розкладу, тарифів)).

Дворівневий підхід до оцінки результатів роботи суден на лініях

Параметри елементів лінії, що розглянуті вище, визначають результати роботи суден і функціонування лінійного сервісу в цілому. Результати оцінюються техніко-експлуатаційними та економічними показниками. Далі, оцінюючи досягнуті відзначені результати або прогнозуючи майбутні результати роботи суден на лінії, виникають два рівня показників:

1) перший рівень – рівень роботи конкретного судна;

2) другий рівень – рівень функціонування лінійного контейнерного сервісу.

Таке розгляд визначається тим, що на лінії можуть працювати кілька суден, з різними характеристиками, що призводить до необхідності дифе-

ренціації результатів їх роботи. Так, при досить успішному функціонуванні конкретного лінійного сервісу, окремо судно може працювати на межі беззбитковості, що вимагає перегляду доцільності його використання на цій лінії. Результати роботи суден $G_{n\gamma}, n = \overline{1, N}, \gamma = \overline{1, \gamma_n}$ є векторними величинами, розмірність яких визначає кількість розглянутих показників, включаючи як техніко-експлуатаційні, так і економічні. Результати $G_n, n = \overline{1, N}$ роботи суден у цілому та функціонування контейнерної лінії є також векторною величиною, $G_n = \langle G_n^1, G_n^2, \dots, G_n^\mu \rangle$, μ – кількість розглянутих показників функціонування лінії, і передбачають два типи показників у своїй структурі.

Перший тип показників (абсолютні величини) – загальний їх індекс i , у цьому випадку розраховуються як сума відповідних показників роботи суден (наприклад, суммарний прибуток або суммарні витрати):

$$G_n^i = \sum_{\gamma=1}^{\gamma_n} G_{n\gamma}^i, n = \overline{1, N}, i = \overline{1, \mu'}, \quad (13)$$

μ' – кількість таких показників.

Другий тип показників – позначимо їх індекс у даному випадку j (речь іде про відносні показники, перш за все) враховує «веса» кожного судна в загальній роботі суден на лінії – наприклад, коефіцієнт використання контейнеромісткості, тайм-чартерний еквівалент):

$$G_n^j = \sum_{\gamma=1}^{\gamma_n} \beta_{n\gamma}^j \cdot G_{n\gamma}^j, n = \overline{1, N}, j = \overline{\mu'+1, \mu}, \quad (14)$$

$\mu - \mu'$ – кількість таких показників, $\beta_{n\gamma}^j$ – веса показників по суднам в результатах функціонування лінії.

Для визначення $\beta_{n\gamma}^j$ пропонується враховувати розмір судна – контейнеромісткість – це основа для визначення $\beta_{n\gamma}^j$: чим більше судно, тим більше вага цього судна в підсумковому результаті функціонування лінії. Як прийнято, для весів мають виконуватися умови:

$$\sum_{\gamma=1}^{\gamma_n} \beta_{n\gamma}^j = 1, n = \overline{1, N}, j = \overline{\mu'+1, \mu}, \quad (15)$$

$$\beta_{n\gamma}^j = \frac{K_{n\gamma}}{\sum_{\gamma=1}^{\gamma_n} K_{n\gamma}}, n = \overline{1, N}, j = \overline{\mu'+1, \mu}, \quad (16)$$

$K_{n\gamma}$ – контейнеромісткість судна γ , працюючого на n лінії; $\sum_{\gamma=1}^{\gamma_n} K_{n\gamma}$ – сумарна контейнеромісткість усіх суден, які працюють на n лінії.

Отже, пропонується всі техніко-експлуатаційні та економічні показники роботи суден на лініях

розглядати з урахуванням даного дворівневого підходу (рівень конкретного судна на лінії та лінії в цілому) і двох типів показників (абсолютних і відносних) на рівні лінії.

Висновки. У даному дослідженні запропоновано формалізований опис структури та параметрів системи морських контейнерних перевезень компанії-перевізника, як сукупності відповідних підсистем лінійних сервісів.

Для підсистеми «лінійний сервіс» основними елементами є: «порти», «судна», «контейнеропотоки», а розклад та тарифи – це додаткові елементи, що відображають умови, за якими здійснюється транспортний процес для власників вантажу, «канали (протоки)» – елементи, що відображають географію маршруту сервісу та впливають на нього з точки зору витрат. Для кожного елемента сформовано відповідну множину параметрів, які у сукупності описують систему

морських контейнерних перевезень компанії-перевізника.

Параметри елементів лінії визначають результати роботи суден і функціонування лінійного сервісу в цілому. Результати оцінюються техніко-експлуатаційними та економічними показниками. Запропоновано дворівневий підхід до оцінки результатів роботи суден: перший рівень – рівень роботи конкретного судна; другий рівень – рівень функціонування лінійного контейнерного сервісу. Запропоновано підхід до визначення двох типів показників для оцінки функціонування лінійного сервісу, що передбачає, зокрема, враховувати контейнеромісткість суден для формування відносних показників (коефіцієнт використання контейнеромісткості, тайм-чартерний еквівалент).

Подальшим розвитком зазначених результатів є формування оптимізаційних моделей для визначення оптимальних параметрів лінійних сервісів.

Список літератури:

1. Кириллова О.В. Типологія транспортно-технологічних систем Водний транспорт. 2016. № 1(24), С. 63-73.
2. Кириллов Ю. І. Організація та управління роботою суден в контейнерній транспортно-технологічній системі: автореф. дис. на здобуття наук. ступеня канд. техн. наук: спец. 05.22.01 / Ю. І. Кириллов; Одес. нац. мор. ун-т. – О., 2013. – 24 с.
3. Кириллова О. В. До питання обґрунтування розподілу контейнеропотоків між суднами, обслуговуваними магістрально-фідерної лінії. *Науковий вісник Херсонської державної морської академії*. 2014. Т. 2. №. 11, С. С. 55-68.
4. Drozhzhyn O. Containership Traffic Optimization on Feeder Shipping Line. *Transport and Telecommunication Journal*. 2016. Vol.17(4), P. 314-321. DOI: 10.1515/tjt-2016-0028
5. Drozhzhyn O., Koskina Y. The Model of Container Feeder Line Organization Focused on the Nature and Parameters of External Container Flows. *Communications – Scientific Letters of the University of Zilina*. 2021. Vol. 23(2), P. 94-102. DOI: 10.26552/com.C.2021.2.A94-A102
6. Ruina Yang, Mingzhu Yu, Chung-Yee Lee, Yuquan Du, Contracting in ocean transportation with empty container repositioning under asymmetric information. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, Volume 145, 2021, Vol. 102173, ISSN 1366-5545, DOI: 10.1016/j.tre.2020.102173.
7. Chien-Chang Chou, Rong-Hua Gou, Chaur-Luh Tsai, Ming-Cheng Tsou, Chun-Pong Wong, Hui-Lin Yu. Application of a mixed fuzzy decision making and optimization programming model to the empty container allocation, *Applied Soft Computing*. 2010. Vol. 10, Issue 4, P. 1071-1079 DOI: 10.1016/j.asoc.2010.05.008
8. Tran, Nguyen & Haasis, Hans. A research on operational patterns in container liner shipping. *Transport*. 2018. Vol. 33, P. 619-632. DOI: 10.3846/transport.2018.1571.
9. Plum, Christian & Pisinger, David & Sigurd, Mikkel. A service flow model for the liner shipping network design problem. *European Journal of Operational Research*. 2014. Vol. 235, P. 378–386. DOI: 10.1016/j.ejor.2013.10.057.
10. Pasha, J., Dulebenets, M.A., Kavooosi, M. et al. Holistic tactical-level planning in liner shipping: an exact optimization approach. *Journal of Shipping and Trade*. 2020. Vol. 5:8 DOI: 10.1186/s41072-020-00060-4
11. Meng Q., Wang S., Andersson H., Thun K. Containership Routing and Scheduling in Liner Shipping: Overview and Future Research Directions. *Transportation Science*. 2014. Vol.48, P. 265-280. DOI: 10.1287/trsc.2013.0461
12. Li M., Xu H. Economies of scale in container ship under uncertainty of traffic volume. Dalian Haishi Daxue Xuebao. *Journal of Dalian Maritime University*. 2013. Vol. 39, P. 103-106.
13. Elmi Z, Singh P, Meriga VK, Goniewicz K, Borowska-Stefańska M, Wiśniewski S, Dulebenets MA. Uncertainties in Liner Shipping and Ship Schedule Recovery: A State-of-the-Art Review. *Journal of Marine Science and Engineering*. 2022. Vol.10(5), P. 563. DOI: 10.3390/jmse10050563

14. Ksciuk J., Kuhlemann S., Tierney K., Koberstein A. Uncertainty in maritime ship routing and scheduling: A Literature review. *European Journal of Operational Research*. 2023. Vol. 308, Issue 2, P. 499-524, DOI: 10.1016/j.ejor.2022.08.006
15. Vyshnevskiy D., Vyshnevskaya O., Onyshchenko S. Modeling of the distribution of the vessels' time budget under long-term freight contracts within conditions of uncertainty. *Розвиток методів управління та господарювання на транспорті*. 2019. Vol. 69 (4), P. 15–25. DOI: 10.31375/2226-1915-2019-4-15-25
16. Koskina Y., Onyshenko S., Drozhzhyn O., Melnyk O. Efficiency of tramp fleet operating under the contracts of affreightment. *Scientific Journal of Silesian University of Technology. Series Transport*. 2023. Vol. 20, P. 137-149 DOI: 10.20858/sjsutst.2023.120.9.
17. Onyshchenko S., Vyshnevskaya O., & Vyshnevskiy D. Justification of the optimal option and transportation parameters for export supplies using marine transport. *Technology Audit and Production Reserves*. 2023. Vol. 2(2(70)), P. 34–39. DOI: 10.15587/2706-5448.2023.277804
18. Onyshchenko S., Melnyk O. Efficiency of ship operation in transportation of oversized and heavy cargo by optimizing the speed mode considering the impact of weather conditions. *Transport and Telecommunication Journal*. 2022. Vol. 23(1), P. 73-80. DOI: 10.2478/tjt-2022-0007
19. Берестенко В., Онищенко С. Ймовірнісні характеристики мультимодальної доставки. *Розвиток транспорту*. 2021. Vol. 1(12), P. 118-128 DOI: 10.33082/td.2022.1-12.10
20. Rusanova S., Onyshchenko S. Development of transport and technological process options' concept for goods delivery with participation of maritime transport. *Technology audit and production reserves*. 2020. Т. 1. (2(51)), P.24–29. DOI: 10.15587/2312-8372.2020.198373
21. Павлова Н.Л., Онищенко С.П. Організація проєктно-орієнтованого управління транспортною компанією (на прикладі транспортно-експедиторської компанії). *Управління розвитком складних систем*, 2020. (42), С. 23-28. DOI: 10.32347/2412-9933.2020.42.23-28
22. Берестенко В., Онищенко С. Структура та характеристики мультимодальної доставки з позиції цифровізації. *Розвиток транспорту*. 2021. 4(11), 82-93. DOI: 10.33082/td.2021.4-11.08

Bondarenko Yu.A. STRUCTURE AND PARAMETERS OF THE CARRIER'S CONTAINER TRANSPORTATION SYSTEM

Management of the liner carrier's fleet involves both strategic and operational decisions, based on a system of relevant technical, operational and economic indicators. These indicators should reflect not only the individual vessel results, but the linear service functioning at all, which is based on the appropriate system of parameters that can be used, on the one hand, to analyze the current situation, on the other hand, for forecasts and optimization of these parameters under certain conditions. This study proposes a structure and parameters formalized description for the maritime container transportation system as a set of relevant subsystems of linear services. For the "liner service" subsystem, the main elements are: "ports", "vessels", "container flows", as well as the schedule and tariffs are additional elements that reflect the conditions under which the transport process is carried out for cargo owners, also "channels" are the elements that reflect the geography of the service route and affect it in terms of costs. For each element, a corresponding set of parameters has formed, which describe the maritime container transportation system for the carrier company. The liner service parameters determine the results of the vessels operation and the functioning of the liner service at all. The results are evaluated by technical, operational and economic indicators. A two-level approach to the evaluation of vessel operation is proposed: the first level is the level of certain vessel operation; the second level – the level of linear container service functioning. An approach to the definition of two types of indicators for evaluating the linear service functioning is proposed, which takes into account the vessel's container capacity to form relative indicators (the container capacity use coefficient, time-charter equivalent). The further development of these results is the formation of optimization models for determining the linear services optimal parameters.

Key words: container transportation, liner service, efficiency, vessel operation, technical and operational indicators.

Вінюков-Проценко А.С.

Національний авіаційний університет

ПЕРСПЕКТИВИ РОЗВИТКУ РИНКУ АВІАЦІЙНИХ ВАНТАЖНИХ ПЕРЕВЕЗЕНЬ В УМОВАХ РОЗВИТКУ МІЖНАРОДНОЇ ЕЛЕКТРОННОЇ КОМЕРЦІЇ

У статті відзначено значну актуальність дослідження впливу зростання кількості конвертацій пасажирських ПС у вантажні на розвитку ринку авіаційних вантажних перевезень враховуючи активний міжнародної електронної комерції. Охарактеризовано передумови та потенційні наслідки для ринку авіаційних вантажних перевезень та ринку лізингу ПС від зростання кількості конвертацій пасажирських ПС у вантажні для ринку авіаційних вантажних перевезень.

Аналіз наукових досліджень дозволив встановити проблематику ринку авіаційних вантажних перевезень, що попередньо досліджувалася, зокрема, її теоретичні концепції та форми, мотиви та цілі процесів. В той же час не було виявлено перспективи розвитку ринку вантажних авіаперевезень в умовах зростання частки електронної комерції та зростання кількості конвертацій ПС.

В рамках дослідження визначено вплив кількості конвертацій пасажирських ПС у вантажні та зростання частки електронної комерції на розвиток ринку авіаційних вантажних перевезень. Визначено напрямки розвитку наукових досліджень щодо розвитку ринку авіаційних вантажних перевезень, а також відзначено, що вплив сучасних тенденцій розвитку вантажних авіаперевезень у світі в останні роки вимагають від учасників ринку забезпечення можливості швидкої переорієнтації діяльності з одного напрямку на інший.

Було охарактеризовано напрямки розвитку ринку авіаційних перевезень вантажів за передумов викликаних пандемією COVID-19 та відновлення ринку міжнародних авіаційних перевезень. Наголошено на тому, що збереження темпів зростання кількості конвертацій вузькофюзеляжних пасажирських ПС неминуче призведе до незворотних процесів зниження тарифів на авіаційні пасажирські перевезення та зміни структури ринку.

Ключові слова: конвертація, авіаційні вантажні перевезення, міжнародна електронна комерція, прогнозування, лізингові ставки, повітряні судна, ринок.

Постановка проблеми. Розвиток ринку авіаційних вантажних перевезень в умовах сьогодення повинен враховувати активний розвиток частки міжнародної електронної комерції та тенденції відновлення ринку міжнародних авіаційних перевезень у постпандемійний період. Сучасні процеси в індустрії міжнародних авіаційних передбачають необхідність швидкого реагування на зміни та підвищення рівня гнучкості авіаперевізників у прийнятті рішень, що до структури та кількості парку ПС. Збереження темпів розвитку конвертацій пасажирських ПС у вантажні на тлі суттєвих затримок у поставці нових пасажирських ПС створює суттєві загрози не тільки для ціноутворення на ринку міжнародних авіаційних вантажних перевезень, а також і для зростання лізингових ставок на пасажирські ПС.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Проблеми впливу пандемії COVID-19 на індустрію міжнародних авіаційних перевезень активно досліджувалися, як вітчизняними, так

і зарубіжними науковцями. Дослідження С. Жент та ін. [1] присвячене обґрунтуванню теоретичних концепцій впливу пандемії на розвиток конвертації пасажирських ПС у вантажні та розгляду ринкових передумов та наслідків для ринку міжнародних авіаційних перевезень, в той же час у дослідженні С. Вандельт та ін [2] аналізується розвиток форм міжнародної економічної інтеграції. Науковці В. Гужва та ін. [3–5] вивчають вплив пандемії та постпандемійного періоду на розвиток ринку лізингу ПС та досліджують детально тенденції ринкових ставок лізингу ПС.

Проте, не було детально виявлено перспектив ринку авіаційних вантажних перевезень в умовах зростання частки електронної комерції та темпів конвертації пасажирських ПС у вантажні.

Постановка завдання. Метою статті є визначення перспектив розвитку ринку авіаційних вантажних перевезень в умовах зростання частки міжнародної електронної комерції та темпів конвертацій пасажирських ПС у вантажні, з ура-

хуванням особливостей відновлення індустрії міжнародних авіаційних перевезень у постпандемийний період.

Виклад основного матеріалу. В умовах поширення міжнародних глобалізаційних та інтеграційних процесів ключове значення для розвитку ринку авіаційних вантажних перевезень, підвищення рівня конкурентоздатності авіаперевізників, забезпечення інтересів суспільства має розвиток частки електронної комерції та розвиток виробництва та конвертацій ПС. Сучасність, максимальна адекватність поточним викликам, ефективність функціонування, гнучкість та адаптивність індустрії авіаційних перевезень стає одним з ключовим завдань світу.

Вантажні комплекси аеропортів відіграють важливу роль у глобальній логістичній системі, забезпечуючи швидку та ефективну транспортацію вантажів між різними країнами та континентами. З плином часу та зростанням обсягів вантажних перевезень з'являються нові виклики та можливості для розвитку цієї галузі

Ключовим питанням щодо забезпечення гармонійного та сталого розвитку ринку авіаційних вантажних перевезень є гнучкість та адаптивність авіаперевізників у прийнятті рішень щодо структури і цілей використання парку повітряних суден.

Існує декілька методів прогнозування попиту на повітряні судна, включаючи аналіз історичних даних, економетричні моделі, а також використання сучасних технік машинного навчання та штучного інтелекту. Кожен з цих методів має свої переваги та недоліки, і їх використання залежить від конкретного контексту та завдання прогнозування. Попит на пасажирські повітряні судна залежить від різних факторів, включаючи економічні умови, зростання населення та доходів, технологічний прогрес у галузі авіації, політичні та регуляторні зміни, а також розвиток туризму та інших галузей. Прогнозування попиту на ПС пов'язане з рядом викликів, включаючи невизначеність економічних та політичних умов, швидкі технологічні зміни, вплив кризових ситуацій та епідемій, а також складність прогнозування довгострокових тенденцій.

Згідно прогнозів до 2042 року провідних виробників авіаційної техніки Boeing та Airbus світовий вантажообіг зросте до 630 трлн. т.к. за темпів зростання вантажних авіаперевезень на рівні 3,5% щорічно. Темпи зростання міжнародної торгівлі перевищать темпи зростання світового ВВП та збільшаться на 90–95% у 2042 році [6–7].

За останні десятиліття електронна комерція зазнала значного зростання, що зумовлено швидким розвитком технологій, змінами у споживчих уподобаннях та зростанням доступності Інтернету. Платформи електронної комерції, такі як Amazon, Alibaba, eBay та інші, здобули величезну популярність серед споживачів у всьому світі. Згідно з даними, обсяги електронної комерції продовжують зростати кожен рік, а прогнозується, що цей тренд буде продовжуватися в майбутньому.

Зростання електронної комерції має значний вплив на галузь вантажних авіаперевезень. Один з основних аспектів цього впливу – збільшення обсягів міжнародних вантажних перевезень. Зростаючий попит на товари, які продаються в інтернет-магазинах, призводить до збільшення потреби у транспортуванні цих товарів з однієї країни в іншу. Зокрема, багато товарів, що продаються в електронних магазинах, мають високу вартість на одиницю, що створює попит на швидкі та надійні способи доставки, такі як вантажні авіаперевезення.

Згідно з економічними теоріями, існує позитивна кореляція між рівнем ВВП та попитом на вантажні авіаперевезення. Зростання економічного потенціалу країни призводить до збільшення обсягів торгівлі та інвестицій, що, в свою чергу, збільшує потребу в швидких та ефективних транспортних послугах.

З іншого боку, високий рівень ВВП відображає також наявність великої кількості високотехнологічних товарів, які вимагають швидкого та безпечного перевезення, що часто досягається саме за допомогою авіаперевезень.

Для підтвердження зазначених теоретичних припущень був проведений аналіз статистичних даних щодо обсягів вантажних авіаперевезень та ВВП в різних країнах та регіонах. Результати аналізу підтверджують існування сильної позитивної кореляції між цими двома показниками.

Залежність попиту на вантажні авіаперевезення від ВВП має значний вплив на економічний розвиток та транспортну логістику. Підвищення обсягів вантажних авіаперевезень може сприяти розвитку транспортної інфраструктури та технологій, що поліпшує логістичні ланцюги та сприяє зростанню торгівлі.

За рахунок розвитку міжнародної електронної комерції частка експрес доставки у структурі вантажних авіаперевезень зросте з 17 до 25% до 2042 року та середньорічний темп зростання прогнозується на рівні 4,9% на відміну від загальних вантажів лише 2,7%.

Розвиток електронної комерції також впливає на логістичні процеси та транспортні витрати. Збільшення обсягів вантажів, які потрібно перевозити, вимагає більш ефективних логістичних рішень, а також призводить до зростання конкуренції серед провайдерів логістичних послуг та перевізників. Крім того, збільшення попиту на вантажні авіаперевезення може призвести до зростання транспортних витрат для підприємств, що залежать від цих послуг.

Довгострокові прогнози дозволяють авіаційним компаніям розробляти стратегічні плани на майбутнє, включаючи розширення мережі маршрутів, придбання нових літаків та модернізацію існуючого флоту. Заздалегідь прогнозування попиту дозволяє компаніям краще планувати використання своїх ресурсів, включаючи кадри, літаки та інші активи.

Довгострокові прогнози піддаються впливу багатьох невизначеностей, таких як економічні зміни, політична нестабільність, катастрофи та інші події, що робить їх менш точними.

Швидкі технологічні зміни можуть суттєво вплинути на попит на повітряні перевезення, але їх важко передбачити довгостроково. Точність прогнозів залежить від якості та достовірності використаних даних, які можуть бути обмеженими або неповними.

Довгострокове прогнозування попиту на пасажирські повітряні судна має свої переваги, але й недоліки. Розуміння цих факторів допомагає авіаційним компаніям краще розробляти свої стратегії та приймати інформовані рішення щодо розвитку бізнесу.

Ринок вантажних авіаперевезень знаходиться в стадії активного розвитку, відображаючи вплив технологій, змін у попиті та екологічні виклики. Незважаючи на ці виклики, галузь залишається ключовим ланцюгом у глобальній логістичній мережі та відіграє важливу роль у забезпеченні ефективної та швидкої доставки товарів.

З урахуванням вищенаведених передумов Boeing прогнозує потребу у вантажних ПС нових та конвертованих на рівні 3745 одиниць у 2042 році на відміну від 2270 у 2022 році. Прогноз Airbus є більш песимістичним та передбачає потребу у вантажних ПС у 2042 році на рівні 3230 одиниць з яких лише 920 нових та 1590 конвертованих та 720 залишаться у експлуатації [6–7].

Проведене нами довгострокове прогнозування згідно методичних підходів провідних авіаперевізників підтверджує тенденції наведені ними та передбачає потребу у вантажних ПС на рівні

3420 одиниць з яких порядку 850 нових та 1600 конвертованих.

Одним із потужних інструментів для аналізу та прогнозування часових рядів є методологія SARIMAX (Seasonal Autoregressive Integrated Moving Average with Exogenous Variables), яка поєднує у собі моделі ARIMA (Autoregressive Integrated Moving Average) з можливістю врахування зовнішніх екзогенних факторів. Застосування SARIMAX в прогнозуванні авіаперевезень має декілька переваг. Методологія SARIMAX здатна ефективно моделювати сезонні зміни, що дозволяє забезпечити точніші прогнози. SARIMAX дозволяє включати в модель додаткові екзогенні змінні, такі як економічні показники, курси валют, погодні умови тощо. У контексті авіаперевезень це може включати такі фактори, як економічний зріст, політична стабільність, туристичні події або навіть погодні умови на маршрутах. SARIMAX дозволяє аналізувати складні та змінні часові ряди, а також легко враховувати зміни у структурі даних. Це особливо важливо в контексті авіаперевезень, де паттерни вантажопотоку можуть змінюватися через різні фактори, такі як зміни в маршрутах, технологічні інновації або зовнішні кризи. Застосування SARIMAX у прогнозуванні авіаперевезень дозволяє отримувати прогнози з високою точністю, що допомагає авіакомпаніям та аеропортам ефективно управляти ресурсами, оптимізувати маршрути та мінімізувати витрати.

Аналіз та прогнозування короткострокових тенденцій на ринку авіаційних вантажних перевезень за методологією SARIMAX проведений нами демонструє зниження попиту (Air cargo demand) та коефіцієнту комерційного завантаження (Load factor) на авіаційні вантажні перевезення у 2024–2025 роках на 5 та 7% відповідно, що в свою чергу призведе до падіння доходів авіаперевізників на 10–15%.

Ця тенденція на наш погляд викликана саме зростанням на ринку кількості конвертованих з пасажирських у вантажні вузькофюзеляжних ПС у кількості 125 Boeing 737 800 P2F та 38 Airbus A 320. За умови збереження темпів конвертації вузькофюзеляжних пасажирських ПС у вантажні їх кількість на 2025 складатиме 250 та 87 відповідно.

З розвитком світової економіки та зростанням обсягів міжнародної торгівлі очікується подальше збільшення вантажних обсягів у міжнародних аеропортах. Це створює нові можливості для роз-

витуку вантажних комплексів, а також вимагає вдосконалення існуючих систем та процесів.

Однією з ключових перспектив розвитку є збільшення інтеграції та співпраці між різними вантажними транспортними вузлами. Це дозволить оптимізувати логістичні ланцюги, зменшити затрати та час доставки вантажів.

Також важливим напрямком розвитку є збільшення уваги до сталого розвитку та екологічної ефективності вантажних комплексів. Впровадження енергоефективних технологій, зменшення викидів.

Зростання лізингових ставок може призвести до збільшення загальних витрат авіакомпаній на оренду літаків, що може вплинути на їхню фінансову стійкість та прибутковість.

Високі лізингові ставки можуть ускладнити доступ до повітряних суден для нових або менш капіталізованих авіакомпаній, що може призвести до обмеження конкуренції на ринку.

Авіакомпанії можуть більше віддалятися від лізингу на користь покупки літаків, якщо лізингові ставки стають неприйнятно високими. Це може призвести до змін у стратегії лізингових компаній та виробників повітряних суден.

Зростання попиту на повітряні перевезення, особливо внаслідок відновлення подорожей після пандемії COVID-19, призводить до збільшення попиту на пасажирські літаки. Це підтримує зростання лізингових ставок, оскільки авіакомпанії шукають додаткові літаки для розширення свого флоту. За останні роки вартість нових повітряних суден значно зросла через підвищення цін на сировинні матеріали та комплектуючі, а також через технічні та екологічні вимоги до нових літаків. Це змушує авіакомпанії шукати альтернативні способи фінансування, такі як лізинг. Нестабільність в геополітичних відносинах, зміни у правилах та регуляціях, а також інші ризики можуть призвести до збільшення лізингових ставок як засобу компенсації ризиків для лізингодавців.

На тлі суттєвих затримок постачання нових вузькофюзеляжних ПС Boeing 737 Max8 та Airbus 320 Neo викликаних постпандемічним дефіцитом компонентів це створює загрозливу тенденцію дефіциту на ринку пасажирських вузькофюзеляжних ПС та зростання лізингових ставок до рекорд-

них значень на 15–20% вище прогнозованих для цього періоду часу.

Вищенаведені тенденції призводять до зростання тиску на ринок авіаційних вантажних перевезень, який викликає прискорене зниження тарифів на авіаційні вантажні перевезення, які переносять багатьох авіаперевізників за межу беззбитковості, що неминуче призведе до ще більшої монополізації ринку найкрупнішими гравцями за рахунок поглинання активів менших та тенденцій до підвищення тарифів у довгостроковій перспективі.

Таким чином необхідне застосування наступних кроків з боку авіаперевізників для зниження тиску на ринок авіаційних вантажних перевезень:

- перегляд у бік зменшення кількості замовлень на конвертацію вузькофюзеляжних пасажирських ПС у вантажні особливо Boeing 737 800NG;
- перегляд структури парку повітряних суден та мереж авіаперевезень для збільшення частки вантажів, що перевозяться у багажовантажних відсіках пасажирських ПС (Belly cargo);
- перегляд стратегічних прогнозів та вироблення механізмів підвищення гнучкості та адаптивності у відповідь на зміни навколишнього середовища.

Для аеропортів з урахуванням тенденції збільшення частки міжнародної комерції та експрес доставок відповідно необхідно переглянути підходи до розвитку інфраструктури обслуговування вантажів зі збільшенням фокусу на експрес доставку.

Висновки. За результатами проведеного дослідження щодо визначення перспектив розвитку ринку авіаційних вантажних перевезень в умовах зростання частки міжнародної електронної комерції було визначено вплив темпів конвертацій пасажирських ПС у вантажні на розвиток авіаційних перевезень в глобалізованому світі. Відзначено при цьому важливість урахуванням особливостей ринку лізингу повітряних суден та його залежності від постпандемічних процесів. Визначено необхідні кроки, здійснення яких вимагають сучасні тенденції розвитку вантажних авіаперевезень. Було охарактеризовано вплив на ціноутворення на ринку лізингу ПС з урахуванням поточних тенденцій.

Список літератури:

1. Zheng S., Wang K., Jiang C. Converting passenger aircraft into cargo planes under volatile market demand. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*. 2024. Vol. 181. 104013. <https://doi.org/10.1016/j.tra.2024.104013>
2. Wandelt S., Sun X., Zhang A. Is the aircraft leasing industry on the way to a perfect storm? Finding answers through a literature review and a discussion of challenges. *Journal of Air Transport Management*. 2023. Vol. 111. 102426. <https://doi.org/10.1016/j.jairtraman.2023.102426>

3. Guzhva, V. S., Raghavan, S., D'Agostino, D. J., 2019a. Chapter 14 – Engine leasing. In: Guzhva, V.S., Raghavan, S., D'Agostino, D.J. (Eds.), Aircraft Leasing and Financing. Elsevier. P. 443–483. <http://dx.doi.org/10.1016/B978-0-12-815285-0.00014-6>, <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780128152850000146>.
4. Guzhva, V. S., Raghavan, S., D'Agostino, D. J., 2019b. Chapter 3 – principles of aircraft leasing versus ownership. In: Guzhva, V.S., Raghavan, S., D'Agostino, D.J. (Eds.), Aircraft Leasing and Financing. Elsevier. P. 65–99. <http://dx.doi.org/10.1016/B978-0-12-815285-0.00003-1>
5. World Air Cargo Forecast 2022–2041. URL: <https://www.boeing.com/commercial/market/cargo-forecast#downloads>
6. Commercial Market Outlook 2023–2042. URL: <https://www.boeing.com/commercial/market/commercial-market-outlook#cmo-app>
7. Global Market Forecast (GMF) for the 2023-2042 period. URL: <https://www.airbus.com/en/products-services/commercial-aircraft/market/global-market-forecast>
8. Is the current passenger-to-freighter aircraft conversion market too optimistic? URL: <https://www.aerotime.aero/articles/is-the-current-passenger-to-freighter-aircraft-conversion-market-too-optimistic>.
9. P2F: experts review the current state of the market and what's ahead. URL: <https://www.aerotime.aero/articles/p2f-experts-review-the-current-state-of-the-market-and-whats-ahead>

Viniukov-Proshchenko A.S. PROSPECTS FOR THE DEVELOPMENT OF THE AIR CARGO MARKET IN THE CONTEXT THE DEVELOPMENT OF INTERNATIONAL E-COMMERCE

The article emphasizes the significant relevance of studying the impact of the growth in the number of passenger aircraft conversions into cargo aircraft on the development of the air cargo market, given the active international e-commerce. The prerequisites and potential consequences for the air cargo market and the aircraft leasing market from the growth in the number of passenger aircraft conversions into cargo aircraft for the air cargo market are characterized.

The analysis of scientific research has made it possible to identify the problems of the air cargo market that have been previously studied, in particular, its theoretical concepts and forms, motives and goals of the processes. At the same time, no prospects for the development of the air cargo market were identified in the context of an increase in the share of e-commerce and an increase in the number of aircraft conversions.

The study determines the impact of the number of conversions of passenger aircraft into cargo aircraft and the growth of the share of e-commerce on the development of the air cargo market. The directions of development of scientific research on the development of the air cargo market are determined, and it is noted that the impact of modern trends in the development of air cargo transportation in the world in recent years requires market participants to ensure the possibility of rapid reorientation of activities from one direction to another.

The author characterized the direction of development of the air cargo market in the context of the COVID-19 pandemic and the recovery of the international air cargo market. It is emphasized that maintaining the growth rate of the number of conversions of narrow-body passenger aircraft will inevitably lead to irreversible processes of reducing tariffs for air passenger transportation and changing the market structure.

Key words: conversion, air cargo transportation, international e-commerce, forecasting, leasing rates, aircraft, market.

УДК 656.2/.5:004.4(477)

DOI <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2024.2/39>**Кириченко Г.І.**

Державний університет інфраструктури та технологій

Бердніченко Ю.А.

Державний університет інфраструктури та технологій

Бердніченко Є.О.

Державний університет інфраструктури та технологій

Юр'єв О.В.

Державний університет інфраструктури та технологій

РОЗВИТОК ІНФОРМАЦІЙНИХ ТЕХНОЛОГІЙ НА ЗАЛІЗНИЦЯХ УКРАЇНИ: ВІД ОБЧИСЛЮВАЛЬНИХ МАШИН ДО СУЧАСНИХ СИСТЕМ УПРАВЛІННЯ

Стаття присвячена історії впровадження засобів автоматизації на залізницях України протягом останніх п'ятдесяти років. Автоматизація почалася на станціях та при передачі звітних даних від дирекцій перевезень до обчислювальних центрів залізниць. Стаття розглядає необхідність впровадження перших ІТ на станціях, обумовлену зростанням обсягів перевезень та потребою у більш швидкій обробці інформації. Основна увага зосереджується на потребі автоматизації процесів формування поїздів та розформування, що стало актуальним через зростання обсягів перевезень. В статті також описується технічна та інформаційна інфраструктура, необхідна для впровадження систем автоматизації на залізницях, зокрема спеціально обладнані приміщення, комп'ютерне обладнання та програмне забезпечення.

У світлі швидкого розвитку інформаційних технологій та постійних змін у вимогах до транспортної інфраструктури, автоматизація управління залізницями стає все більш актуальною та необхідною. Українська залізниця, впроваджуючи різні системи автоматизації, створює фундамент для покращення якості послуг та оптимізації використання ресурсів.

Автоматизація процесів на залізницях не лише дозволяє підвищити продуктивність та ефективність роботи, але й сприяє покращенню безпеки перевезень та оптимізації витрат. Впровадження сучасних інформаційних технологій, таких як система управління вантажними перевезеннями та система динамічної роботи станційного вузла, допомагає у здійсненні стратегічного управління транспортними потоками та адаптації до змінних умов на ринку.

Досвід впровадження та функціонування різних систем автоматизації на залізницях України є важливим джерелом знань для подальшого розвитку та вдосконалення транспортної галузі. Такі системи дозволяють забезпечити більш точне та оперативне управління рухом поїздів, планування перевезень, а також ефективне використання інфраструктури залізниць.

Ключові слова: автоматизація, залізниця, інформаційні технології, обчислювальна техніка, станція, програмне забезпечення.

Постановка проблеми. Українська залізниця стикається з низкою викликів у контексті оптимізації своєї діяльності та підвищення рівня ефективності. Однією з основних проблем є необхідність постійного модернізації та вдосконалення систем управління та контролю, оскільки транспортна інфраструктура зазнає постійних змін у зв'язку з розвитком технологій та зміною вимог ринку.

Крім того, існує проблема неефективного використання ресурсів та розподілу транспортних

потоків, що може призвести до затримок у перевезеннях, перевищення термінів доставки та погіршення якості обслуговування клієнтів. Брак системи ефективного управління та моніторингу може також призвести до збільшення витрат та зниження конкурентоспроможності залізниці на ринку.

Таким чином, необхідно розробити та впровадити сучасні інформаційні технології, які дозволять підвищити ефективність управління рухом поїздів, оптимізувати розподіл транспортних

потоків, зменшити час знаходження вантажу на станціях та підвищити рівень обслуговування клієнтів.

Впровадження засобів автоматизації на залізницях України має власну історію, якій вже більше п'ятдесяти років. Народжувалась автоматизація у просторі двох складових експлуатаційного процесу – на залізничних станціях і при передачі звітних даних від дирекцій перевезень до обчислювальних центрів залізниць відповідно до ієрархії управління.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Аналіз літературних джерел [1–5], що стосуються впровадження інформаційних технологій на залізницях України, свідчить про значний прогрес у цій сфері протягом останніх п'ятдесяти років. Зокрема, джерела вказують на перехід від ручної обробки документів до автоматизованих систем, які значно полегшують і прискорюють процеси розподілу вагонів, формування поїздів та моніторингу руху транспорту.

Літературні джерела відзначають етапи еволюції інформаційних технологій на залізницях, починаючи від встановлення великих електронно-обчислювальних машин у 80-х роках до сучасних комплексних систем автоматизованого управління. Вони також акцентують увагу на значенні ефективного використання ресурсів та оптимізації процесів з метою підвищення конкурентоспроможності та покращення якості обслуговування.

Постановка завдання. Мета статті полягає в аналізі історії впровадження інформаційних технологій на залізницях України протягом п'ятидесяти років, від початку їхнього застосування до сучасних комплексних систем автоматизованого управління.

Виклад основного матеріалу. Необхідність впровадження перших ІТ на станціях, крім світового прогресу і намаганнями держави тих часів не відстати від нього [6], була обумовлена наступними кількома факторами. Головні з них – це необхідність переробки великої кількості інформації про вагони та вантажі відповідно до призначень плану формування поїздів та визначення черговості розформування поїздів, що очікують обробки по прибуттю. «Вручну» це ставало робити все довше, тому що обсяги перевезень в цей час, а саме у середині 70-х – на початку 80-х років минулого сторіччя, нарощувалися. Для спеціалістів, знайомих із роботою сортувальних станцій, очевидні витрати робочого часу та відповідальність людини, що визначає колії сортувального парку для накопичення вагонів відповідно

до станції призначення вантажу. Для дотримання технології процесів розформування – формування поїздів у голові працівника трималися знання про:

- існуючий план формування на станції, який встановлює порядок накопичення вагонів тільки у відповідно встановленому напрямку, станції призначення майбутнього поїзда та його категорії;
- оперативні зміни до плану формування;
- спеціалізацію колій сортувального парку, тобто встановлену технологічним процесом станції відповідність колії сортувального парку до станції призначення поїзду, що формується;
- довжину колій, у т.ч. сортувального парку.

Вочевидь, що на потужних сортувальних станціях таких як Дарниця, Нижньодніпровськ-Вузол, Запоріжжя-Ліве, Ясинувата, Харків-Сортувальний, Основа, Клепарів та інші такого класу (їх відносили до позакласних за обсягом роботи) для виконання обробки документів при формуванні поїздів була задіяна значна кількість людей. Це були працівники технічних контор, так називалися функціональні підрозділи, що наразі мають назву – станційні технологічні центри з обробки документів (СТЦ). Обсяги обробки за добу склали на потужних станціях до 6000 вагонів. Щоб підготувати состави поїздів до розформування, а саме скласти сортувальні листи на них, у технічній конторі, наприклад на станції Дарниця тільки в одній системі, працювало 5 осіб у зміну. Зрозуміло, функції обробки інформації потребували використання засобів обчислювальної техніки, яка вже широко впроваджувалася на залізничних станціях світу. У 80-х роках на сортувальних станціях України, назвемо їх – вирішальними – встановлювалися потужні на той час, електронно-обчислювальні машини (ЕОМ), наприклад ЕС1010 на станції Дарниця, Нижньодніпровськ-Вузол, Кривий Ріг Сортувальний. До «великих» ЕОМ відносилась також міні-ЕОМ СМ14, що працювала на станції Запоріжжя-Ліве.

Великі обсяги оперативної інформації про роботу сортувальних станцій, прикладне програмне забезпечення (ПЗ) та операційна система потребували потужних обсягів пам'яті, які мали тільки великі ЕОМ. Обладнання та експлуатація таких машин, у свою чергу, вимагала значної площі станційних спеціально обладнаних приміщень, прокладання траншей для каналів зв'язку із терміналами на робочих місцях; наявності кваліфікованих фахівців, що володіли машинно-орієнтованими мовами програмування. Таким чином, на кожній із сортувальних станцій створювалася своя унікальна система.

Обсяги оперативної пам'яті ЕОМ, що використовувалися у 70–80-х рр складали від 16 Мб до 1024 Мб, це забезпечувало на той момент функціонування прикладних програм, операційної системи (ОС) та оперативної бази даних (БД), системи управління БД та інформаційного забезпечення. Для порівняння зазначимо, що обсяг оперативної пам'яті сучасної АСУ станції, що має назву «Динамічна робота станційного вузла» в складі Автоматизованої системи керування вантажними перевезеннями УЗ (АСК ВП УЗ-Є) досягає близько 4–8 Гб.

Таким чином, для реалізації інформаційної технології – АСУ станції – необхідним є програмно-апаратний комплекс, до складу якого входять: обладнання ЕОМ, ОС, мережа передачі даних (МПД), система управління БД (СУБД), прикладне програмне забезпечення (ППЗ) та інформаційне забезпечення, що включає в себе нормативну базу, і дозволяє дії користувача.

Звернемо увагу на співвідношення між витратами на технічні засоби і витратами на розробку прикладного програмного забезпечення (ППЗ). З розвитком швидкими темпами технологій створення парку комп'ютерів, ціна їх знижується, вартість праці програмістів збільшується. Тому і зазначене співвідношення змінюється протягом періоду впровадження АСУ на станціях. У середині 70-х – на початку 80-х років воно складало близько 9:1. Тобто вартість ЕОМ була значно більше витрат на розробку ППЗ. Наразі це співвідношення орієнтовно становить, за оцінками експертів, 1:9. Можна сказати, що вартість ЕОМ знижується, ціна інтелектуальної праці розробників програмного забезпечення збільшується.

Перехідний період – від впровадження АСУ сортувальної станції на великих ЕОМ, що були встановлені на вирішальних станціях, до функціонування сучасної АСУ в складі АСК ВП УЗ-Є, автоматизовані робочі місця (АРМ) якої встановлені наразі на кожній вантажній станції – супроводжувався впровадженням різних систем та різноманітного обладнання. З 80-х років минулого століття було впроваджено АСУ станції на СМ 2, міні-ЕОМ СМ 1800, СМ 1810, *Robotron-1715*. Так, СМ 1800 впроваджувалась для реалізації задачі АСУ стикового пункту на станціях Миронівка, Кривий Ріг, Кривий Ріг Головний та інші. В комплексі ЕОМ *Robotron-ів* (станція Апостолове) працівник технічної контори, називаємо зараз – станційного технологічного центру (СТЦ), працював вже безпосередньо на ПЕОМ у системі з розподіленою БД. Пізніше тут, була впроваджена АСУ

СС (з назвою КС АРМ, комплексна система автоматизованих робочих місць) на ПЕОМ і базою даних на сервері. Сервер – це потужна головна персональна ЕОМ (ПЕОМ), що утримує БД АСУ і відповідає за розподілення її ресурсів на інших комп'ютерах системи.

Слід відмітити, що у період 80–90 рр. в економіці посилювалися вимоги до ефективності виробництва [7]. Залізничники впроваджували різноманітні прогресивні методи організації експлуатаційної роботи, що сприяли її раціоналізації на станціях. Відомо, що експлуатаційники контролюють ефективність своєї роботи за рядом показників. Серед цих показників важливим є час, а саме час знаходження вагона на станції; час обігу вагону на дирекції, залізниці. Вочевидь, що скорочення часу знаходження вагону на сортувальних станціях, залежить від швидкості накопичення та відправлення сформованих поїздів. Один із факторів пришвидшення накопичення [2], пов'язаний з наявністю вагонів відповідних призначень – струй, що очікують розформування у парках прибуття та ефективним визначенням черговості їх обробки. Оптимальне рішення (ОР) утворюється при перебірці варіантів розформування та порівняння результатів накопичення вагонів у сортувальному парку при формуванні нових составів. Така задача сформульована у класичі експлуатаційної роботи як план (прогноз) поїздоутворення. Вочевидь, ефективно планувати відправлення поїздів на позакласних станціях було вкрай важко без використання обчислювальних засобів. Таким чином, реалізація задачі щодо розрахунку плану поїздоутворення на позакласних станціях була одним із основних факторів, нагальною необхідністю та важливою причиною використання ЕОМ в оперативній експлуатаційній роботі. *(На жаль, із зменшенням обсягів перевезення ця функція втрачається.)*

Таким чином, для впровадження АСУ роботою станцій існували об'єктивні умови – загальний технічний прогрес та суб'єктивні умови – вимоги підвищення ефективності перевезень і контролю за використанням ресурсів. Узагальнимо цілі впровадження ЕОМ на сортувальних станціях:

- обробка інформації з метою розрахунку технологічних документів для організації роботи станції;

- формування плану поїздоутворення для ефективного накопичення вагонів і відправлення поїздів, що сформовані станцією.

З середини 90-х років розроблюються і впроваджуються АСУ станції на базі комп-

лексу ПЕОМ – КС АРМ. Цю принципово нову програмно-апаратну технологію опанували розробники інформаційно-обчислювального центру (ІОЦ) Південної залізниці і впровадили її на ряді станцій. У цей же період перед ІТ-працівниками залізниць України постала задача створення вітчизняної розробки АСУ станції і фахівці тієї ж Південної залізниці з успіхом розробляють першу національну інформаційну систему [3]. Комплексна система електронного обміну документів (КСЕОД), з кінця 90-х років вона впроваджувалась на всіх сортувальних станціях залізниць України. Так, на початку 2000-х на зміну «великим» ЕОМ, що займали багато місця, потребували особливого штату супроводження і розробки програмного забезпечення фахівцями, які володіли мовами програмування, що орієнтовані на операційну систему конкретної обчислювальної машини, прийшли ПЕОМ із БД на серверах, стандартні засоби супроводження та програмування. Система КС ЕОД [3] надала зручний сервіс працівникам станцій та збільшила розуміння експлуатаційників про можливості та переваги використання обчислювальної техніки при організації роботи.

Паралельно з розвитком системи АСУ станції на залізницях України розроблюється АСК ВП УЗ, яка з часом функціонує на всіх шести ІОЦ залізниць. Згодом, у 2012 р., створюється єдина автоматизована система управління вантажними перевезеннями УЗ – АСК ВП УЗ-Є [4, 7], база даних якої містить всі операції з вагоном та вантажем у процесі перевезення, тобто створюється загальний інформаційний простір залізниць України. Вочевидь, перевезення включає в себе знаходження вагонів та вантажів на сортувальних станціях, тому виникла потреба функціонування АСУ станції у спільному інформаційному просторі. Завдяки розробці АСК ВП УЗ-Є та новій програмно-апаратній технології – системі відображених моделей (СВММ), а також досвіду розробки та функціонування КС ЕОД, ІТ фахівцями України була створена новітня програмна розробка. Вона має назву «Динамічна робота станційного вузла» (ДРСВ) або простіше – Динамічна модель станції (ДМ), що функціонує у складі АСК ВП УЗ-Є.

Існуюча АСУ складається з двох основних модулів, які використовуються в залежності від обсягів та характеру роботи станції. Динамічна модель станції відображає динаміку подій – операції з вагоном (за часом їх виконання) на коліях станції. В умовах роботи сортувальної станції це процеси розформування – формування нових

составів поїздів у загальному інформаційному просторі АСК ВП УЗ-Є. Таким чином створюються моделі колій та парків і станції у цілому, що дозволяє реалізовувати всі основні технологічні задачі експлуатаційної роботи [5].

Аналізуючи зміст складових АСУ, що наведено на рис. 2, звернемо увагу на те, що завдяки технічному прогресу та розвитку комп'ютерних технологій, зміни відбулися у всіх складових системах. Устаткування змінилося з великих ЕОМ на елегантні комп'ютери, які не тільки не поступаються, але і перевершують перших у потужностях. Мережа передачі даних на додачу до провідних каналів доповнилася оптоволоконним кабелем, супутниковим або мобільним зв'язком та пристроями, що утворюють сучасну мережу – модеми, конвертори, маршрутизатори, комутатори локальної мережі (Switch) тощо. Виникли міжнародні стандартні системи управління БД. Операційні системи Windows 2016, 2019, 2023. Бази даних ORACLE, MySQL. Прикладне програмне забезпечення доповнилося новими задачами, реалізацію яких вимагали експлуатаційники. Функції же АСУ станції залишаються незмінними у своїй технологічній основі, як і основний склад інформаційного, нормативного забезпечення, що орієнтовано на користувача системи.

До складу основних функції автоматизованої системи з формування технологічних документів для організації роботи сортувальної станції на базі динамічної моделі відносяться:

- підготовка інформації про склад поїзда, що знаходиться у парку прибуття, до розформування;
- складання розміченого натурного листа (НЛ);
- складання сортувального листа для організації розпуску;
- ведення накопичувальної системи по коліях сортувального парку;
- формування нового складу поїзда та розрахунок документів на відправлення;
- формування звітів та облікових документів.

З впровадженням Динамічної моделі станції у середовище АСК ВП УЗ-Є можливо б було зупинитися із розвитком АСУ цього типу, так як система повністю охоплює сортувальну роботу. З іншого боку на станціях функціонують різні підрозділи [9], що здійснюють обробку вагонів та вантажів: технічні пункти, комерційні, контейнерні майданчики, на прикордонних станціях – передавальні. Всі існуючі операції з поїздами, вагонами та вантажами доцільно відображати у єдиному інтерфейсі системи, не розділяючи на функції окре-

мих АРМів, але реалізувати вибір потрібних операцій на робочому місці працівника. Таким чином, на станціях, незалежно від характеру та обсягів їх роботи, існуватиме єдиний зручний інтерфейс користувача.

Майбутній розвиток системи, на нашу думку, також пов'язаний з автоматичним введенням інформації про операції з поїздом, вагоном, а значить і вантажем. Сучасні системи з'єму даних забезпечать дотримання основних вимог до репрезентативності інформаційного забезпечення [8], що характеризує якість первинних даних та включає такі критерії, як оперативність (своєчасність), достовірність, повнота та однорідність. Перспектива використання автоматичних відео-засобів, програмних контролерів, систем супутникової навігації у технологічних процесах забезпечить виконання важливого правила функціонування системи – одноразового введення первинних даних [9].

Висновки та пропозиції. Розвиток технологій та зміни в цінній політиці призвели до зміни співвідношення між витратами на технічні засоби і витратами на розробку прикладного програмного забезпечення (ППЗ) в процесі впровадження автоматизованих систем управління на залізницях. Під час перехідного періоду від впровадження АСУ на великих ЕОМ до сучасних систем, виникали різні виклики та потреби в розвитку інфраструктури. Важливими завданнями впровадження були обробка інформації для розрахунку технологічних документів та формування плану поїздотворення

для ефективного накопичення та відправлення поїздів. Впровадження різних систем та обладнання, таких як АСУ на великих ЕОМ, комплекси ПЕОМ, системи електронного обміну документів, дозволило підвищити ефективність роботи станцій та раціоналізувати процеси експлуатації.

Завдяки розвитку інформаційних технологій і впровадженню сучасних систем управління, таких як АСК ВП УЗ-Є та Динамічна робота станційного вузла (ДРСВ), залізниці України можуть оптимізувати процеси перевезень та забезпечувати ефективне функціонування станцій. Розробка та впровадження таких систем відображає сучасні вимоги до автоматизації та підвищення ефективності управління транспортними потоками. Аналіз розвитку автоматизованих систем, які використовувалися раніше і функціонують наразі на залізничних станціях України, дозволив зробити ще один із висновків – основні технологічні функції АСУ станції залишаються незмінними і не залежать від технічних засобів, операційної системи та системи управління базою даних. З точки зору системного аналізу на станції є об'єкти управління; стаціонарні – станція, колія, парк; нестационарні – вантаж, вагон, контейнер, локомотив, локомотивна бригада, інформація, та операції з цими об'єктами. Тому, на нашу думку, при розробці та впровадженні систем не доцільно орієнтуватися на характер роботи станції та обсяги її роботи. Слід визначати набори та обсяги операцій з об'єктами управління і враховувати обсяги їх при розробці та вдосконаленні АСУ станції.

Список літератури:

1. Кириченко Г.І., Бердніченко Ю.А., Стрелко О.Г., Антонів О.С. Забезпечення дотримання технологічного процесу залізниці при використанні автоматизованої системи. *Вчені записки ТНУ імені В.І. Вернадського. Серія: Технічні науки*. Том 33 (72) № 6. 2022. С. 243-246. <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2022.6/39>
2. Бочаров О. П., Мукмінова Т. А. Централізація інформаційних ресурсів та формування інформаційного середовища на залізничному транспорті. *Залізничний транспорт України*. 2007. № 4. С. 4–9.
3. Statyuka Y., Kyrychenko H., Strelko O., Berdnychenko Y. Control of technological processes using A fuzzy controller of the system for management of cargo delivery by railway. *Acta Scientiarum Polonorum, Administratio Locorum* this link is disabled. 2021. № 20(3). P. 241–251.
4. Кириченко Г.І., Бердніченко Ю.А. Складові інформаційної моделі перевізного процесу вантажних перевезень залізничного транспорту. *Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті*. 2021. Том 26 № 3. С.12-17. <https://doi.org/10.18664/iksz.v26i3.240455>
5. Fomin O., Lovska A., Horban A. Historical aspects of construction and operation of train ferry routes. *History of Science and Technology*. Vol. 11, no. 2. P. 351-382. <https://doi.org/10.32703/2415-7422-2021-11-2-351-382>
6. Бочаров О. П., Михальов Г. О., Мороз В. П., Шиш В. О. Динамічна модель сортувальної станції та її роль в подальшій оптимізації процесу перевезень. *Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті*. 2011. № 5. С. 74-76.
7. Огар О. М., Ломотько М. Д. Шляхи удосконалення автоматизованої логістичної системи управління залізничними станціями. *Інтелектуальні технології управління транспортними процесами : зб. матері-*

алів Міжнар. наук.-техн. конф., 17–18 листоп. 2020 р. Секція: Інтелектуальні технології управління транспортними процесами : тези доп. / Харків. нац. автомоб.-дор. ун-т. Харків, 2020. С. 11-12.

8. Овчарук І., Боклаг Є. Інформаційні системи на залізничному транспорті: розвиток та перспективи. *Цифрова платформа: інформаційні технології в соціокультурній сфері*. 2020. № 3(2). С. 170–182. <https://doi.org/10.31866/2617-796x.3.2.2020.220594>

9. Великодний В. В., Ковдря Д. В., Цейтлін С. Ю. 10 років розвитку інформаційних технологій залізничної галузі. *Залізничний транспорт України*. 2017. № 1. С. 16-23.

Kyrychenko H.I., Berdnynchenko Yu.F., Berdnynchenko Ye.O., Yuriyev O.V. DEVELOPMENT OF INFORMATION TECHNOLOGIES IN UKRAINIAN RAILWAYS: FROM COMPUTING MACHINES TO MODERN MANAGEMENT SYSTEMS

The article is dedicated to the history of implementing automation tools in Ukrainian railways over the past fifty years. Automation began at stations and in the transmission of reporting data from transport directorates to railway computing centers. The article discusses the necessity of introducing the first IT solutions at stations, driven by increasing transportation volumes and the need for faster information processing. The main focus is on the need for automating train formation and disbandment processes, which became relevant due to growing transportation volumes. The article also describes the technical and information infrastructure required for implementing automation systems on railways, including specially equipped premises, computer hardware, and software.

In light of rapid developments in information technology and evolving requirements for transportation infrastructure, railway management automation becomes increasingly relevant and necessary. By implementing various automation systems, Ukrainian railways are laying the foundation for improving service quality and resource utilization optimization.

Automation of processes on railways not only enhances productivity and efficiency but also contributes to improving transportation safety and cost optimization. The adoption of modern information technologies, such as freight transportation management systems and dynamic station operation systems, aids in strategic traffic management and adaptation to market fluctuations.

The experience of implementing and operating various automation systems on Ukrainian railways is a crucial source of knowledge for further development and improvement of the transportation sector. Such systems enable more accurate and timely train traffic management, transport planning, and efficient utilization of railway infrastructure.

Key words: automation, railway, information technology, computing technology, station, software.

УДК 349.2:656.6
DOI <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2024.2/40>

Кузьменко В.С.

Херсонська державна морська академія

Гузь А.М.

Херсонська державна морська академія

Кузьменко О.Ю.

Херсонська державна морська академія

ОСОБЛИВОСТІ ПРОВЕДЕННЯ ІНСТРУКТАЖІВ З ПИТАНЬ ОХОРОНИ ПРАЦІ НА МОРСЬКОМУ СУДНІ

Стаття присвячена питанню проведення інструктажів з питань охорони праці на морському судні. Визначено, що ефективність інструктажів залежить від багатьох факторів, включаючи якість навчального матеріалу, використання сучасних технологій, індивідуалізацію підходів до навчання, а також від мотивації та залучення екіпажу. Оптимізація процесу інструктажів та створення умов для активної участі персоналу можуть значно покращити їхню ефективність, забезпечити високий рівень безпеки на борту суден та сприяти формуванню позитивної культури охорони праці в морському секторі. Доведено, що особлива увага має приділятися розробці та впровадженню інноваційних підходів до навчання, які можуть зробити інструктажі більш інтерактивними, практичними та привабливими для екіпажу, що включає використання симуляцій, віртуальної реальності, мобільних додатків для навчання, які дозволяють моделювати реальні ситуації та розвивати навички реагування на надзвичайні ситуації в контрольованому середовищі. Мотивація та залученість екіпажу в процес навчання вимагає створення стимулів та визнання важливості їхньої ролі в забезпеченні безпеки судноплавства та важливо забезпечити можливість для зворотного зв'язку та активної участі в процесі розробки та вдосконалення інструктажів, що дозволить екіпажу відчувати свою причетність до процесу та сприятиме більш глибокому засвоєнню знань. Підкреслено значення інструктажів для забезпечення безпеки на морських судах та необхідність постійного покращення процесів їх проведення через інновації, індивідуалізацію підходів, активне залучення та мотивацію екіпажу. Оптимізація інструктажів є критично важливою для підвищення загального рівня безпеки в морській індустрії, формування культури безпеки серед морських екіпажів, а також для виконання міжнародних стандартів і вимог в області охорони праці. Ефективні інструктажі сприяють не тільки зниженню ризику нещасних випадків та професійних захворювань, але й забезпечують готовність екіпажів до дій у складних та надзвичайних ситуаціях, що є невід'ємною частиною забезпечення безпеки та ефективності морського транспорту. Таким чином, увага до розвитку та вдосконалення процедур інструктажів з охорони праці є важливою інвестицією в майбутнє морського судноплавства та безпеку мореплавства в цілому.

Ключові слова: морське судно, техніка безпеки, охорона праці, екіпаж судна, міжнародна конвенція, інструктаж.

Постановка проблеми. Актуальність дослідження полягає у зростаючій необхідності підвищення рівня безпеки та охорони праці в морській індустрії. Морський транспорт є життєво важливою складовою світової економіки, але разом з тим є одним із найбільш ризикованих видів діяльності щодо виникнення нещасних випадків, професійних захворювань та інцидентів на робочому місці. Забезпечення безпеки на морських судах вимагає чіткої організації роботи, належного проведення інструктажів та навчання екіпажу, які спрямовані на попередження потенційних небезпек та мінімі-

зацію ризиків, крім того і особливості морських умов, такі як ізольованість, обмежені можливості для евакуації, змінні метеорологічні умови, високі фізичні та психологічні навантаження на членів екіпажу, вимагають специфічних підходів до організації охорони праці.

У контексті глобалізації та постійного розвитку технологій, а також з урахуванням зміни клімату та екологічних викликів, актуальність такого дослідження ще більше зростає, так і нормативно-правове регулювання в галузі охорони праці та безпеки мореплавства постійно оновлюється та

вимагає адаптації з боку морських компаній [6]. Вивчення особливостей проведення інструктажів дозволяє не тільки відповідати цим нормам, але й ефективно впроваджувати кращі практики з підвищення безпеки праці. Таким чином, дослідження має на меті не лише теоретичний аналіз існуючих підходів до проведення інструктажів з питань охорони праці на морському судні, але й практичне застосування отриманих даних для зниження рівня професійних ризиків і підвищення ефективності роботи екіпажу судна.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Дослідження Родрігес Х. [1] зосереджено на інтеграції віртуальної реальності в інструктажі, що демонструє, як віртуальні симуляції можуть підвищити залучення учасників та поліпшити розуміння реальних умов роботи на судні. Використання інтерактивних тренажерів та симуляторів значно підвищує ефективність навчання, дозволяючи екіпажу безпечно відпрацьовувати дії у критичних ситуаціях.

Чжан Й. Лін і Чан [13] в своєму дослідженні акцентують на важливості створення мотиваційної системи в процесі інструктажів, що включає визнання, винагороди та кар'єрне зростання. Вони стверджують, що залучення екіпажу та його активна участь в інструктажах забезпечують не лише краще засвоєння матеріалу, але й сприяють формуванню культури безпеки на судні.

В дослідженнях [8, 9] розглядається проблематика адаптації інструктажів до мультикультурного складу екіпажу. Вони наголошують на необхідності розробки інструктажів, що враховують культурні та мовні особливості членів екіпажу, а також рекомендують використання візуальних засобів та практичних вправ для подолання мовного бар'єру.

Аналіз Кружилко О., Ткалич І., Сірик А., Полукаров О. [5] показує, що успіх проведення інструктажів залежить не тільки від якості навчального матеріалу, але й від системного підходу до організації процесу навчання. Він пропонує створення централізованої бази даних інструктажів, що дозволить керівництву суден ефективно управляти навчальним процесом, відстежувати прогрес кожного члена екіпажу та оперативно вносити зміни у навчальні програми згідно з актуальними потребами.

Огляд літератури з теми проведення інструктажів з питань охорони праці на морському судні вказує на комплексний характер цього процесу, який вимагає інтеграції сучасних технологій, індивідуалізації підходів, активного залучення

екіпажу та систематичного оновлення навчального матеріалу. Важливість ефективних інструктажів для безпеки мореплавства не може бути переоцінена, оскільки вони забезпечують не лише відповідність міжнародним стандартам безпеки, але й сприяють формуванню безпечної поведінки екіпажу, знижуючи ризик виникнення аварій та нещасних випадків на морі.

Постановка завдання. Мета дослідження полягає в аналізі методів і підходів до організації інструктажів з охорони праці на морських суднах, ідентифікація їхніх особливостей, ефективності та можливих проблемних зон.

Виклад основного матеріалу. Охорона праці на морських суднах є важливою складовою міжнародного морського права та морської індустрії, оскільки забезпечує безпеку і здоров'я моряків під час виконання їхніх професійних обов'язків і сама важливість пояснюється високим рівнем ризику для життя та здоров'я екіпажів морських суден, що вимагає чіткого розуміння загальних положень охорони праці, а також знання міжнародних конвенцій та норм. Основоположним принципом охорони праці в морському транспорті є створення безпечних умов праці, що мінімізують ризик виникнення нещасних випадків та професійних захворювань серед моряків, це означає комплексний підхід до оцінки ризиків, планування та впровадження заходів щодо їх запобігання чи мінімізації. Такі заходи включають технічне обладнання суден, організацію праці, навчання персоналу, медичне забезпечення, а також контроль і моніторинг стану робочого середовища та здоров'я екіпажу. Власне міжнародне морське право включає широкий спектр конвенцій та договорів, що регулюють питання охорони праці на морі, серед найважливіших можна виділити [4, 11]:

1) Міжнародну конвенцію про охорону людського життя на морі (SOLAS), що встановлює стандарти безпеки для будівництва, обладнання та експлуатації суден;

2) Міжнародну конвенцію про стандарти навчання, атестації та вахтової служби моряків (STCW), яка регламентує вимоги до підготовки, кваліфікації та вахтової служби морського персоналу;

3) Міжнародну конвенцію про працю в морському секторі (MLC, 2006), відому як «Морська хартія праці», що охоплює широкий спектр питань, від умов праці та життя на судні до соціального забезпечення моряків.

Ці міжнародні документи визначають основні стандарти і вимоги до забезпечення безпеки,

здоров'я та благополуччя моряків, а також встановлюють механізми контролю за їх дотриманням, крім того, важливим аспектом є не лише формальне прийняття цих конвенцій країнами, але й ефективне впровадження встановлених норм і стандартів у національне законодавство та практику.

Попри існування міжнародних конвенцій та норм, що регулюють охорону праці на морі, практична реалізація цих положень часто зустрічає ряд викликів, і це може бути пов'язано з відмінностями в інтерпретації та застосуванні міжнародних стандартів у різних країнах, недостатнім фінансуванням заходів з охорони праці, а також складнощами з контролем за дотриманням встановлених вимог на практиці. Розвиток технологій, зміни в міжнародному судноплаванні та глобальні екологічні виклики також впливають на сферу охорони праці на морі, вимагаючи постійного оновлення та адаптації існуючих норм і стандартів і в цьому контексті важливу роль відіграє міжнародне співробітництво, обмін знаннями та кращими практиками між країнами та організаціями. Організаційні і практичні основи охорони праці на морських суднах, закріплені в міжнародних конвенціях та нормах, відіграють ключову роль у формуванні безпечних умов праці в морській індустрії, втім, ефективне впровадження цих принципів вимагає постійної уваги, адаптації до змінюваних умов і викликів, а також активної співпраці між усіма зацікавленими сторонами на міжнародному рівні.

Морське середовище, характеризуючись своєю непередбачуваністю та динамічністю, ставить перед охороною праці на морських суднах особливі виклики. Важливість цієї теми обумовлена не лише високим рівнем ризику для життя та здоров'я моряків, але й необхідністю забезпечення ефективного функціонування морського транспорту як життєво важливої складової глобальної економіки. Робота на морському судні супроводжується рядом специфічних ризиків, що вимагають особливої уваги з боку охорони праці [1]:

– по-перше, це фізичні ризики, що включають в себе ризик падіння за борт, травматизм через падіння на палубі або в трюмах, а також ризик пов'язаний з роботою у складних метеорологічних умовах;

– по-друге, є хімічні ризики, особливо на суднах, що перевозять небезпечні вантажі, що можуть включати отруєння або хімічні опіки;

– по-третє, біологічні ризики, що можуть виникати через контакт з забрудненою водою або через укуси морських тварин.

Робоче середовище на морі відрізняється своєю ізоляцією та обмеженістю простору, що створює додаткові виклики для охорони праці, так моряки часто змушені працювати у вузьких приміщеннях, на висоті або у важкодоступних місцях, що збільшує ризик травматизму. Крім того, робота на судні передбачає тривалі вахти, які можуть спричинити психологічний та фізичний втомлюваність, має місце і ізоляція від звичного соціального середовища та обмежені можливості для відпочинку також можуть негативно впливати на психічне здоров'я моряків [7].

Основним викликом для охорони праці на морських суднах є розробка та впровадження ефективних заходів, спрямованих на мінімізацію ризиків та забезпечення безпечних умов праці, що вимагає комплексного підходу, що охоплює технічне обладнання судна, організацію праці, навчання та підготовку екіпажу, а також розробку ефективних заходів реагування на надзвичайні ситуації. Однією з ключових задач є проведення регулярних інструктажів та тренувань для екіпажу, які б дозволили підвищити рівень їх підготовленості до дій у надзвичайних ситуаціях, і крім того, важливим є забезпечення судна необхідним обладнанням для особистого захисту, а також розробка та дотримання чітких процедур безпеки. Використання сучасних технологій, таких як автоматизація та дистанційне керування, може допомогти знизити рівень фізичного навантаження на екіпаж та підвищити безпеку роботи на морі. Тим не менш, це також створює нові виклики, пов'язані з необхідністю постійного навчання персоналу для роботи з новітніми технологіями. Організація інструктажів на морських суднах має відповідати ряду стандартів та вимог, які спрямовані на забезпечення ефективного навчання екіпажу з питань безпеки та охорони праці і містити [3, 7]:

1) Регулярність проведення інструктажів, означає, що вони мають проводитися регулярно та при кожній зміні екіпажу, а також у випадках внесення змін до норм безпеки або експлуатації судна.

2) Специфічність інструктажів означає, що кожен тип інструктажу (початковий, повторний, цільовий, передрейсовий) має бути адаптований під конкретні умови роботи та специфіку обов'язків членів екіпажу.

3) Зміст інструктажів має на меті те, що вони повинні охоплювати всі аспекти безпеки роботи на судні, включаючи правила користування засо-

бами індивідуального захисту, дії у надзвичайних ситуаціях, правила поведінки у випадку пожежі, затоплення судна тощо.

4) Документування необхідно для того, щоб кожен інструктаж має бути належним чином задокументований, з зазначенням дати проведення, теми, переліку учасників та особи, яка проводила інструктаж.

Впровадження цих вимог на практиці вимагає від судовласників та керівництва морських компаній не лише розуміння важливості безпеки та охорони праці, але й активної участі у підготовці та проведенні інструктажів. Забезпечення безпеки на морських судах – це комплексна задача, що вимагає координації дій всіх членів екіпажу та постійного підвищення рівня їхніх знань та умінь в області охорони праці.

Регулювання та нормативна база інструктажів з охорони праці на морському транспорті відіграють ключову роль у забезпеченні безпеки морських перевезень та виконання встановлених міжнародними конвенціями та договорами вимог до організації інструктажів дозволяє не тільки підвищити рівень обізнаності екіпажу про потенційні ризики, але й формує культуру безпеки на судні, що є запорукою збереження життя та здоров'я людей на морі.

Охорона праці на морських судах вимагає не лише ретельного підходу до впровадження стандартів безпеки, але й ефективної системи навчання та інструктажів для екіпажу. Враховуючи особливості роботи в морському середовищі, де ризики здоров'ю та безпеці працівників вищі, ніж у багатьох інших галузях, правильно організовані інструктажі відіграють критичну роль у попередженні нещасних випадків та забезпеченні безпеки на судні. Розглянемо види інструктажів, їх особливості, етапи проведення, а також відповідальні особи та їхні обов'язки [10]. Існує декілька ключових видів інструктажів, кожен з яких відіграє свою роль у системі охорони праці на морських судах:

1) Вступний інструктаж проводиться при прийомі на роботу нового працівника. Він ознайомлює з основними правилами та нормами охорони праці на судні, засобами індивідуального захисту, а також з найважливішими надзвичайними процедурами.

2) Первинний інструктаж на робочому місці спрямований на детальне ознайомлення з конкретним робочим місцем, його особливостями, потенційними небезпеками та заходами безпеки, що мають бути вжиті.

3) Повторний інструктаж проводиться періодично (зазвичай раз на рік) для поновлення знань та інформації з охорони праці серед усього екіпажу.

4) Цільовий інструктаж необхідний при зміні технології роботи, введенні в експлуатацію нового обладнання чи при виконанні робіт підвищеної небезпеки.

5) Надзвичайний інструктаж проводиться у випадку виникнення ситуацій, які можуть загрожувати безпеці екіпажу або судна, для відпрацювання дій у надзвичайних умовах [8].

Кожен з цих видів інструктажів має свої особливості та розроблений для вирішення конкретних завдань у сфері охорони праці.

Процес проведення інструктажу можна розділити на декілька ключових етапів [12]:

1) Підготовчий етап, що включає визначення мети інструктажу, підбір необхідних матеріалів, визначення категорій працівників для участі.

2) Інформаційний етап, на якому учасникам інструктажу надається вся необхідна інформація з питань безпеки, потенційних ризиків та методів їх запобігання.

3) Практичний етап, що включає демонстрацію правильних методів роботи, використання засобів індивідуального захисту та навчання дій у надзвичайних ситуаціях.

4) Контрольний етап, на якому перевіряється розуміння і засвоєння матеріалу учасниками інструктажу, часто за допомогою тестування або практичних завдань.

5) Заключний етап, що включає оформлення документації про проведення інструктажу з підписами усіх учасників.

За організацію і проведення інструктажів з охорони праці на морському судні відповідають капітан судна та офіцери, які відповідають за безпеку. Капітан судна несе загальну відповідальність за безпеку екіпажу та судна і забезпечує впровадження та дотримання вимог охорони праці. Офіцери з безпеки, у свою чергу, відповідають за розробку та актуалізацію інструктажів, підготовку необхідних матеріалів, проведення самого інструктажу та оцінку його ефективності. Ефективне проведення інструктажів на морських судах є ключовим аспектом забезпечення безпеки та охорони праці в морському секторі, так в останні роки значно зросла роль сучасних підходів до навчання, зокрема, використання інтерактивних технологій та симуляторів, що відкриває нові можливості для підвищення ефективності інструктажів [2].

Сучасні методики навчання та інструктажу на морських суднах спрямовані на створення умов для активного залучення учасників до процесу навчання, підвищення їх мотивації та забезпечення кращого засвоєння матеріалу. Серед ключових підходів можна виділити:

- Інтерактивне навчання. Використання дискусій, групових робіт, кейс-методів дозволяє підвищити залученість учасників інструктажу та сприяє глибшому розумінню матеріалу.

- Компетентнісний підхід. Навчання спрямоване не лише на засвоєння теоретичних знань, а й на формування практичних навичок та компетенцій, необхідних для безпечної роботи на судні;

- Модульні програми навчання. Розподіл інструктажів на модулі дозволяє зосередитися на конкретних аспектах безпеки, роблячи навчання більш цілеспрямованим та ефективним;

- Блендове навчання. Комбінація онлайн-навчання та традиційних інструктажів дозволяє гнучко підходити до організації навчального процесу, забезпечуючи доступ до навчальних матеріалів у будь-який час.

Інтерактивні технології та симулятори відіграють особливу роль у навчанні та інструктажах, оскільки вони забезпечують умови, максимально наближені до реальних ситуацій на судні, дозволяючи екіпажу відпрацьовувати дії у безпечному середовищі. Симулятори містків керування та машинних відділень дозволяють моделювати різноманітні навігаційні та інженерні ситуації, відпрацьовуючи навички управління судном у стандартних та екстремальних умовах. Віртуальна реальність (VR) застосовується для імітації різноманітних сценаріїв, зокрема пожежі на борту, аварійних ситуацій з затопленням судна, що дозволяє ефективно відпрацювати алгоритми дій екіпажу. Електронні навчальні платформи надають доступ до широкого спектру навчальних матеріалів, інструкцій та відео, що сприяє самостійному вивченню та повторенню матеріалу. Інтерактивні тренажери для відпрацювання навичок використання засобів індивідуального захисту та обладнання для боротьби з пожежами допомагають забезпечити високий рівень підготовленості екіпажу до дій у надзвичайних ситуаціях. Використання сучасних технологій та інтерактивних методів навчання дозволяє значно підвищити ефективність інструктажів, забезпечуючи глибоке засвоєння матеріалу та формування стійких практичних навичок. Це, у свою чергу, сприяє підвищенню загального рівня безпеки на морських суднах, мінімізуючи ризики для здоров'я та життя екіпажу [5].

Проведення інструктажів є невід'ємною частиною будь-якої ефективної системи управління охороною праці і це важливий інструмент не тільки для навчання та розвитку персоналу, але й для підтримання безпечного робочого середовища. Однак на шляху до створення ефективної системи інструктажів можуть виникати численні труднощі та бар'єри, а також бути допущені помилки, які знижують ефективність всього процесу. При цьому слід виділити потенційні труднощі та бар'єри [9]:

- мовний бар'єр проявляється в тому, що в мультикультурному робочому середовищі мовний бар'єр може стати серйозною проблемою для ефективного спілкування та засвоєння матеріалу інструктажів;

- різниця у рівнях кваліфікації та досвіду, так учасники інструктажу можуть мати різну професійну підготовку та досвід, що вимагає індивідуалізації підходів до навчання;

- обмеження часу означає що, високий темп роботи та велике навантаження на персонал можуть обмежувати час, який може бути виділений на інструктажі, що робить складним проведення глибоких та всебічних навчальних сесій;

- недостатня мотивація персоналу означає що, брак залученості та інтересу з боку учасників інструктажу може суттєво знизити ефективність навчального процесу.

Приклади найбільш поширених помилок при проведенні інструктажу на морському судні:

- недостатня практична спрямованість проявляється через те, що часто інструктажі зосереджені на теоретичних знаннях без достатнього залучення практичних вправ, що не дозволяє ефективно відпрацювати навички, необхідні для безпечної роботи;

- недоліки в плануванні та підготовці, проявляються в тому, що неповне або неправильне планування інструктажів, що не враховує специфіку робочого місця або конкретні потреби персоналу, може призвести до недостатньої ефективності навчання;

- відсутність зворотного зв'язку від учасників, виглядає як мало уваги зворотному зв'язку від учасників інструктажів, організатори можуть упустити важливу інформацію про ефективність та релевантність навчального матеріалу;

- ігнорування новітніх технологій, у випадку відмови від використання сучасних навчальних інструментів і технологій може обмежити можливості для покращення якості інструктажів та зробити навчальний процес менш ефективним;

– загальний характер інформації. Надання занадто загальної або неспецифічної інформації, що не враховує реальні ризики та особливості конкретного робочого місця або операції, може призвести до нерозуміння важливості вимог безпеки серед персоналу.

Своєчасне оновлення інструктажів з урахуванням нових нормативів, технологій та методик забезпечить актуальність та релевантність інформаційного матеріалу та залучення екіпажу до оновлення і систематизації інструктажів з охорони праці на судні:

– мотивація та залучення екіпажу до процесу інструктажів відіграють ключову роль у формуванні культури безпеки на борту. це допомагає забезпечити не тільки формальне дотримання правил, а й глибоке розуміння їх важливості;

– участь екіпажу в процесі розробки інструктажів може підвищити їх мотивацію та інтерес до навчання, оскільки вони відчуватимуть себе частиною процесу та відповідальними за його результати;

– впровадження системи винагород за активну участь у інструктажах та демонстрацію високого рівня знань з питань безпеки може слугувати додатковим стимулом для екіпажу.

Ефективність інструктажів залежить від багатьох факторів, включаючи якість навчального матеріалу, використання сучасних технологій, індивідуалізацію підходів до навчання, а також від мотивації та залучення екіпажу. Оптимізація процесу інструктажів та створення умов для активної участі персоналу можуть значно покращити їхню ефективність, забезпечити високий рівень безпеки на борту суден та сприяти формуванню позитивної культури охорони праці в морському секторі.

Висновки. Аналіз особливостей проведення інструктажів на морському судні виявив низку

ключових аспектів, що впливають на їх ефективність та значення для забезпечення безпеки мореплавства. Основні висновки дозволяють глибше зрозуміти важливість цього процесу та напрямки його оптимізації. Було оговорено доцільність використання інтерактивних технологій та симуляторів суттєво збільшує ефективність інструктажів, дозволяючи екіпажу відпрацьовувати навички реагування на надзвичайні ситуації в контрольованому, безпечному середовищі. Визначено необхідність активного залучення та мотивації екіпажу в процесі інструктажів, що сприятиме кращому засвоєнню матеріалу, формуванню відповідального ставлення до питань безпеки та створенню позитивної культури охорони праці на судні.

Визначено, що методи та техніки проведення інструктажів на морських суднах переживають справжній ренесанс завдяки впровадженню сучасних підходів до навчання та активному використанню інтерактивних технологій та симуляторів. Це дозволяє не лише підвищити рівень безпеки на суднах, але й сприяє формуванню культури безпеки, що є основою ефективної охорони праці в морській індустрії. Ефективність інструктажів з охорони праці значною мірою залежить від умілого поєднання традиційних та новітніх підходів до навчання, здатності враховувати специфіку робочого середовища та потреби персоналу. Подолання труднощів та помилок, які можуть виникнути в процесі, вимагає зусиль з боку організаторів інструктажів, готовності до інновацій та вдосконалення процесів навчання. У такий спосіб можна значно підвищити рівень безпеки на робочому місці, знизити ризики для здоров'я та життя персоналу, а також сприяти формуванню позитивної культури охорони праці на морському судні.

Список літератури:

1. Здановський В.Г., Гогіташвілі Г.Г., Степанишин В.М. Нове у системі управління охороною праці на основі системного підходу та імплементації євростандартів. *Проблеми охорони праці в Україні*. 2016. Вип. 31. С. 3-11.

2. Конвенція про зобов'язання судновласників у разі хвороби, травми або смерті моряків від 24.10.1936 № 55 : переглянуто Конвенцією № 993_519 від 23.02.2006. Офіційний веб-сайт Верховної Ради України. URL: https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/993_156#Text (дата звернення: 01.03.2024).

3. Про ратифікацію Конвенції Організації Об'єднаних Націй з морського права 1982 року та Угоди про імплементацію Частини XI Конвенції Організації Об'єднаних Націй з морського права 1982 року : Закон України від 03.07.1999 № 728-XIV. Офіційний веб-сайт Верховної Ради України. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/728-14#Text> (дата звернення: 01.03.2024).

4. Конвенція МОП № 186 про працю у морському судноплавстві. Офіційний веб-сайт Верховної Ради України. URL: https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/993_519 (дата звернення: 01.03.2024).

5. Кружилко О.Є., Ткалич І.М., Сірик А.О., Полукаров О.І. Теоретичні основи та інформаційне забезпечення оцінювання виробничого ризику. *Харчова промисловість*. 2019. С. 124–132.

6. Македон В.В., Холод О.Г., Ярмоленко Л.І. Модель оцінки конкурентоспроможності високотехнологічних підприємств на засадах формування ключових компетенцій. *Академічний огляд*. 2023. № 2 (59). С. 75-89. DOI: 10.32342/2074-5354-2023-2-59-5.
7. Bailey N.J., Ellis N., & Sampson H.A. Exploring differences in perceptions of risk, and its management, amongst personnel directly associated with the operation of ships. Cardiff, Cardiff University, 2012. 308 p.
8. Haas B., Oh S., Dalton K., Chang S., Fitzpatrick J., Minami K., Matsui H., Xue G., An J., Azmi K., Davis R., Lin H., Jung M., & Hanich Q. Untangling Jurisdictional Complexities for Crew Labour Regulations on Fishing Vessels in the Western and Central Pacific Ocean. *The International Journal of Marine and Coastal Law*. 2023. № 38(4). pp. 661-680. DOI: <https://doi.org/10.1163/15718085-bja10120>.
9. Haines S. Developing Human Rights at Sea. *Ocean Yearbook Online*. 2021. № 35. pp. 18-51. DOI: 10.1163/22116001_03501003.
10. Makedon V., Dzeveluk A., Khaustova Y., Bieliakova O., Nazarenko I. Enterprise multi-level energy efficiency management system development. *International Journal of Energy, Environment, and Economics*. 2021. Volume 29, Issue 1. pp. 73-91.
11. Rodriguez J. International regulations on labour health and safety applied to fishing and maritime transport sectors. Are maritime workers under-protected. *International Maritime Health*. 2012. Vol. 63(3). pp. 67-78.
12. Safety and Shipping Review 2023. Website Allianz. 2023. URL: <https://commercial.allianz.com/content/dam/onemarketing/commercial/commercial/reports/AGCS-Safety-Shipping-Review-2023.pdf> (дата звернення: 02.03.2024).
13. Zhang Y. Labor Rights Protection of Marine Enterprise Employees Based on the Labor Law. *Journal of Coastal Research*. 2020. № 110. DOI: 10.2112/JCR-SI110-049.1.

Kuzmenko V.S., Guz A.M., Kuzmenko O.Yu. FEATURES OF CONDUCTING INSTRUCTIONS ON LABOR SAFETY ON MARINE VESSELS

The article is devoted to the issue of briefings on labor protection issues on a sea vessel. The effectiveness of training depends on many factors, including the quality of the training material, the use of modern technologies, the individualization of training approaches, as well as the motivation and involvement of the crew. Optimizing the process of briefings and creating conditions for the active participation of personnel can significantly improve their efficiency, ensure a high level of safety on board ships and contribute to the formation of a positive culture of labor protection in the maritime sector. Particular attention should be paid to the development and implementation of innovative training approaches that can make training more interactive, practical and engaging for the crew, including the use of simulations, virtual reality, mobile training applications that allow simulation of real situations and development of emergency response skills in a controlled environment. The motivation and involvement of the crew in the training process requires the creation of incentives and recognition of the importance of their role in ensuring the safety of shipping, and it is important to provide an opportunity for feedback and active participation in the process of developing and improving the training, which will allow the crew to feel their involvement in the process and contribute to a deeper assimilation of knowledge. The importance of briefings for ensuring safety on sea vessels and the need for continuous improvement of their conduct processes through innovation, individualization of approaches, active involvement and motivation of the crew are emphasized. Optimizing briefings is critical for improving the overall level of safety in the maritime industry, forming a safety culture among marine crews, as well as for meeting international standards and requirements in the field of occupational health and safety. Effective briefings contribute not only to reducing the risk of accidents and occupational diseases, but also ensure the readiness of crews to act in difficult and emergency situations, which is an integral part of ensuring the safety and efficiency of maritime transport. Thus, attention to the development and improvement of occupational health and safety briefing procedures is an important investment in the future of maritime shipping and maritime safety in general.

Key words: sea vessel, safety equipment, labor protection, ship's crew, international convention, briefing.

Кучма О.С.

Національний авіаційний університет

РАЦІОНАЛІЗАЦІЯ СИСТЕМ ОРГАНІЗАЦІЇ КОМПЛЕКСНОЇ МЕХАНІЗАЦІЇ Й АВТОМАТИЗАЦІЇ НАВАНТАЖУВАЛЬНО-РОЗВАНТАЖУВАЛЬНИХ РОБІТ У ПУНКТАХ СПОЛУЧЕННЯ АВІАЦІЙНОГО ТА ІНШИХ ВИДІВ ТРАНСПОРТУ

У статті відзначено важливість навантажувально-розвантажувальних робіт, їх зв'язок із обслуговуванням вантажопотоків та нерозривність зв'язку із процесом доставки вантажів. Охарактеризовано характерні особливості проведення навантажувально-розвантажувальних робіт.

Здійснений аналіз наукових досліджень дозволив встановити проблеми організації навантажувально-розвантажувальних робіт, які активно досліджувалися вітчизняними та зарубіжними науковцями. Було відзначено прогресивність комплексної механізації та автоматизації та вивчено різні оптимізаційні задачі щодо розподілу навантажувально-розвантажувальних ресурсів та оптимізації планів роботи.

При всій актуальності проблеми не було виявлено актуальних підходів щодо раціоналізації систем організації комплексної механізації й автоматизації навантажувально-розвантажувальних робіт у пунктах сполучення авіаційного та інших видів транспорту.

В рамках дослідження описано характерні особливості виконання навантажувально-розвантажувальних робіт залежно від місця їх проведення, були охарактеризовані підготовчі-заклучні операції, зроблено висновок щодо необхідності створення більш оптимальних технологічних та організаційних рішень для вирішення поставлених завдань.

Спираючись на встановлені у попередніх дослідженнях особливості навантажувально-розвантажувальних робіт визначено особливості їх виконання у процесі перевезення вантажу повітряним транспортом та за його участю. Було представлено технологічну схему авіаперевезення вантажів на відправлення та іншу відповідну схему на призначення. Охарактеризовано технологію обробки вантажів в трансферному аеропорту та відзначено найбільш прогресивну схему «повітряне судно – повітряне судно». Детально описані особливості організації перевезення вантажу в авіаційних засобах пакування. Також були визначені особливості перевезення окремими та об'єднаних (консолідованих) партій вантажів на авіаційному виді транспорту.

Ключові слова: система, комплексна механізація, автоматизація, навантажувально-розвантажувальні роботи, раціоналізація.

Постановка проблеми. Навантажувально-розвантажувальні роботи (НРР) є невід'ємною частиною процесу доставки вантажів різними видами транспорту, зокрема й повітряним. Вони забезпечують необхідне обслуговування вантажопотоку в різних технологічних процесах: формуванні вантажних одиниць, завантаженні, розвантаженні або перевантаженні транспортного засобу, складських операціях, операціях у аеропортах, портах, залізничних станціях та ін. Ці роботи мають достатню трудомісткість, напругу впливають на безпеку перевезень та цілість вантажу, тривалість простою транспортного засобу під вантажними операціями, пропускну здатність транспортних терміналів. На різних видах транспорту НРР мають різну тривалість та вартість і, в залежності від схеми перевезення, можуть

декілька разів повторюватися в рамках одного перевізного процесу.

При розробці сучасних систем доставки вантажів намагаються скоротити кількість, тривалість та вартість НРР. Наприклад, це можливо при доставці вантажів «від дверей до дверей», крос-докінгових операціях, перевезеннях в універсальних контейнерах, які активно використовуються в мульти-модальних та змішаних перевезеннях. Тривалість проведення НРР також значною мірою залежить від структури вантажопотоку, виду вантажних одиниць та їх об'ємно-масових характеристик, вантажопідйомності та вантажомісткості транспортних засобів.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Проблеми організації навантажувально-розвантажувальних робіт активно досліджувалися вітчизняними та зарубіжними науковцями.

На основі визначених у [1] М. А. Полтавцем та О. Д. Омельченком ключових інструментів та залежностей транспорту за критеріями прогресивності для вдосконалення роботи та функціонування поточних ліній і комплексів запропоновано удосконалені схеми вантажопотоків від виробника до споживача, що є актуальними для більшості магістральних видів транспорту, проте для авіаційного транспорту та випадків взаємодії із ним необхідно ці схеми суттєво доопрацювати. Спираючись на результати досліджень, які представлені у [2–5] погоджуємося із тим, що найбільш оптимальним підходом слід вважати комплексну механізацію та автоматизацію, як найбільш прогресивні та ефективні. Різні оптимізаційні задачі щодо розподілу навантажувально-розвантажувальних ресурсів та оптимізації планів роботи засобів НРР, що були успішно вирішені авторами у [6–7] дозволяють говорити про значну актуальність цих завдань, як для теоретичних досліджень, так і для практичної роботи.

Особливості організації навантажувально-розвантажувальної роботи на авіаційному виді транспорту були явно недостатньо досліджені у науковій літературі. Можна відзначити наукові роботи С. Л. Литвиненка [8] та К. В. Марінцевої [9] у яких автори вирішують окремі специфічні задачі щодо організації навантажувально-розвантажувальних робіт при авіаційному перевезенні надважких та негабаритних вантажів і визначення оптимальної кількості пунктів для навантаження та розвантаження у вантажному складі аеропорту відповідно.

Проте, було виявлено, що потребують подальшого вирішення завдання раціоналізації систем організації комплексної механізації й автоматизації навантажувально-розвантажувальних робіт у пунктах сполучення авіаційного та інших видів транспорту.

Постановка завдання. Метою статті є визначення раціональних технологічних схем повітряного перевезення вантажів на відправлення та на прибуття, а також перевезення вантажів в авіаційних засобах пакетування.

Виклад основного матеріалу. За місцем виконання НРР у процесі доставки вантажів розрізняють: НРР у клієнтури (вантажовідправника та вантажоодержувача) та НРР в транспортних вузлах (аеропортах, портах, залізничних станціях та ін.). Виконання НРР у клієнтури здійснюється силами та засобами вантажовідправника та вантажоодержувача або уповноваженими ними особами, наприклад експедитором або логістичним оператором. НРР в транспортних вузлах можуть вико-

нуватися силами та засобами перевізників, або спеціалізованими підприємствами, зокрема хендлінговими агентами та стивідорними компаніями. Логістичні оператори також можуть мати власні склади на території аеропортів, залізничних станцій, а також виконувати повний комплекс операцій з обробки вантажів в транспортних вузлах. НРР роботи в процесі перевезення є різноманітними та виконуються не тільки при безпосередньому завантаженні, розвантаженні та перевантаженні транспортного засобу, а й на складах, у вантажному дворі, на вантажному пероні тощо.

Також перед початком НРР із завантаження та вивантаження транспортного засобу іноді необхідно виконати підготовчі-заклучні операції, наприклад, провести певну температурну обробку вантажу, обробку проти змерзання, або таку підготовку до розвантаження як відновлення сипкості вантажу. При завантаженні транспортного засобу тарно-штучними вантажами та засобами пакетування обов'язково необхідно виконати швартування вантажів та закріплення засобів пакетування, зокрема контейнерів.

На основі визначених у [10, с. 10] даних, що при перевезеннях вантажу автомобільним транспортом, витрати на виконання НРР складають біля 25–30% від загальних витрат на доставку вантажу, а при невеликих відстанях перевезення вантажів більше 50%, доходимо висновку у необхідності створення більш оптимальних технологічних та організаційних рішень.

На основі визначених науковцями особливостей НРР визначимо особливості виконання НРР у процесі перевезення вантажу повітряним транспортом та за його участю. Технологічний процес перевезення вантажів за участю авіаційного транспорту включає різні технологічні схеми: на відправлення, на прибуття та трансфер, обробку вантажів навалом та у засобах пакетування, а також окремими та консолідованими партіями. Також для різних категорії спеціальних вантажів існують певні особливості у технології їх обробки та зберігання в аеропорту.

На рис. 1 представлено технологічну схему авіаперевезення вантажів на відправлення. Другий етап виконуються силами та засобами вантажовідправника, або уповноваженими ним експедитором, або логістичним оператором. Час доставки узгоджується з перевізником та службами аеропорту. Завезення вантажу в аеропорт виконується як правило автомобільним транспортом. Час на завантаження ПС є обмеженим, НРР виконуються відповідно до технологічного графіку обслугову-



Рис. 1. Технологічна схема авіаперевезення вантажів на відправлення

вання ПС в аеропорту. НРР біля ПС виконуються силами та засобами аеропортів, перевізників, або хендлінгових агентів. За завантаження та розвантаження вантажу на ПС стягуються відповідні аеропортові збори.

В той же час технологічна схема при прибутті вантажу на повітряному транспорті включає технологічні операції, які наведено на рис. 2. НРР біля

ПС виконуються силами та засобами аеропортів, перевізників, або хендлінгових агентів. Час на розвантаження ПС також є обмеженим. Розвантаження виконується у відповідності до технологічного графіку обслуговування ПС в аеропорту. НРР у вантажоодержувача виконуються силами та засобами вантажоодержувача або уповноважених ним осіб.

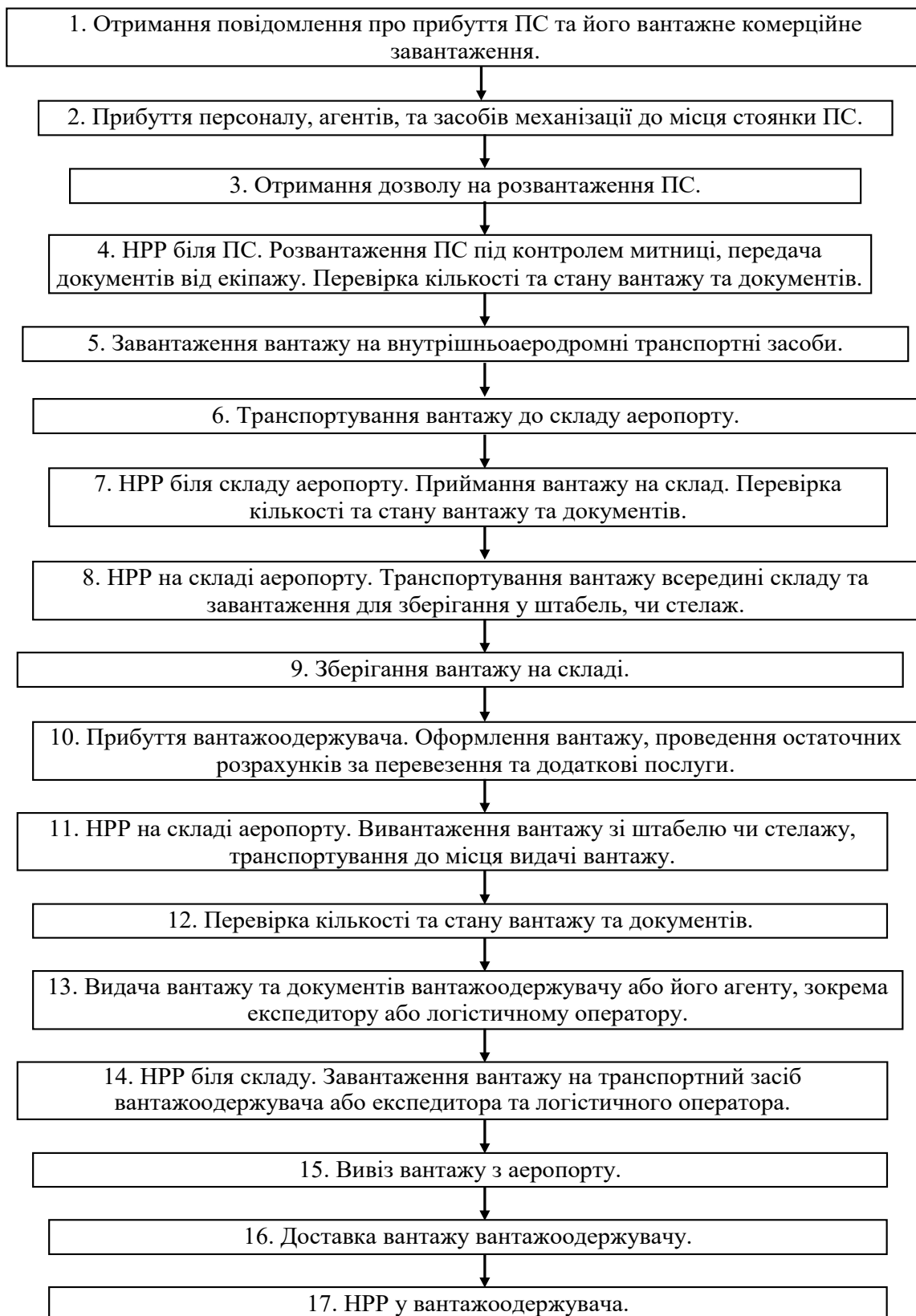


Рис. 2. Технологічна схема при прибутті вантажу на повітряному транспорті

На інших видах транспорту при транспортуванні масових вантажів до цих технологічних процесів додаються процеси підготовки тран-

спортного засобу до завантаження вантажу, що входить до обов'язків перевізника та процес очищення транспортного засобу після перевезення

вантажу, що зазвичай входить до обов'язків вантажоодержувача.

Технологія обробки вантажів в трансферному аеропорту має свої особливості: вантаж обробляється спочатку по схемі прибулого вантажу, а потім як відправленого вантажу, за виключенням окремих технологічних операцій. Не виконуються операції видачі вантажу вантажоодержувачу та прийняття вантажу від вантажовідправника. Трансферний вантаж сортується, відокремлюється від прибулого вантажу та направляється на зберігання у трансферну зону, де чекає наступного рейсу. Потім трансферне завантаження об'єднується з початковим завантаженням та завантажується на наступний рейс. Тобто процес обробки трансферного вантажу йде за схемою «ПС – склад аеропорту – ПС». Для забезпечення виконання цих процесів необхідний відповідний час стикування рейсів.

Мінімальний час трансферу залежить від технічних можливостей аеропорту трансферу, ступеню механізації та автоматизації технологічних процесів обробки вантажів та враховується при розробці маршруту авіаційного перевезення. Іноді в розвинених аеропортах світу обробка трансферних вантажів можлива за схемою «повітряне судно – повітряне судно».

При організації перевезення вантажу в авіаційних засобах пакування (ULD) технологічна схема обробки вантажів на відправлення доповнюється додатковими операціями на складі вантажного терміналу: доставкою порожніх ULD в зону комплектування, завантаженням ULD. При завантаженні ULD враховуються пункти призначення вантажу, об'ємно-масові характеристики вантажу та його сумісність. На ULD оформлюються відповідні документи, вони пломбуються, розробляється схема завантаження ULD у ПС. Потім вантаж в ULD перевантажується на внутрішньоаеродромні засоби механізації які призначені для транспортування ULD до ПС в тій послідовності, в якій вони будуть завантажені. Вантаж транспортується до місця стоянки ПС. При завантаженні перевіряються пломби, кількість ULD та документація. Завантаження ULD у ПС здійснюється за допомогою спеціальних засобів механізації. Далі ULD переміщуються всередині вантажних відсіків ПС згідно зі схемою завантаження, встановлюються на певні позиції у ПС та закріплюються. В технологічній схемі обробки вантажів у ULD на прибуття всі операції

виконуються у зворотній послідовності. Процес закінчується на складі аеропорту розвантаженням ULD та сортуванням вантажу та прийняттям його на зберігання.

Формування та розформування авіаційних ULD здійснюється на складах аеропорту. Вони мають специфічну форму та конструкцію, обмежене застосування та використовуються тільки для авіаційних перевезень. Аеропорти мають спеціальні ділянки для зберігання ULD. Авіакомпанії, яким належать ULD, організують їх облік, своєчасний ремонт та організацію їх обігу.

Іноді повітряним транспортом також перевозиться вантаж у універсальних контейнерах, призначених для змішаних наземних, морських та повітряних перевезень. Ці перевезення можливі тільки на вантажних літаках достатньо великої вантажопідйомності. Такі контейнери обробляються без їх розформування та передаються одержувачу після перевірки цілісності пломб без перевірки кількості місць, стану й маси вантажу, що знаходиться у контейнері.

Повітряним транспортом вантаж перевозиться окремими та об'єднаними (консолідованими) партіями. Окрема партія вантажу – це одне або декілька місць вантажу, що перевозиться від одного вантажовідправника до одного вантажоодержувача та оформлена однією звичайною авіаційною накладною (AWB). Консолідацію, тобто об'єднання в одну партію різні більш дрібні партії вантажів окремих вантажовідправників зазвичай здійснює агент з обробки вантажу, або експедитор або логістичний оператор.

Висновки. За результатами проведеного дослідження щодо раціоналізації систем організації комплексної механізації й автоматизації навантажувально-розвантажувальних робіт у пунктах сполучення авіаційного та інших видів транспорту було визначено технологічні схеми авіаперевезення вантажів на відправлення та на прибуття, а також відзначено особливості на інших видах транспорту та при їх сполученні із авіаційним. Встановлення особливостей організації перевезення вантажу в авіаційних засобах пакування (ULD) щодо формування технологічних схем обробки вантажів, а також особливостей перевезення вантажів у універсальних контейнерах, призначених для змішаних наземних, морських та повітряних перевезень також повинно сприяти оптимізації міжнародних перевезень вантажів за участю авіаційного транспорту.

Список літератури:

1. Полтавець М. А., Омельченко О. Д. Наукові основи комплексної механізації та автоматизації навантажувально-розвантажувальних транспортно-складських робіт при взаємодії з рухомим складом та макрологістичні системи поточних ліній і комплексів. *Наукоємні технології*. 2016. № 3. С. 308–314.
2. Швець М. Д., Кірічок О. Г., Познаховський В. А. Механізація та організація виробничого процесу при виконанні навантажувально-розвантажувальних робіт. *Наукові нотатки*. 2018. Вип. 62. С. 226–229.
3. Ковальов Ю. А., Плешко С. А., Лавренчук В. І. Класифікація сучасних пристроїв для перевантаження об'єктів транспортування. *Легка промисловість*. 2016. № 4. С. 46–48.
4. Версанова Г. А. Особливості визначення собівартості навантажувально-розвантажувальних робіт в портах. *Розвиток методів управління та господарювання на транспорті*. 2018. Вип. 3. С. 54–65.
5. Лаврухін О. В., Митрофанова О. В. Удосконалення автоматизованої технології оперативного планування роботи залізничної станції. *Збірник наукових праць Української державної академії залізничного транспорту*. 2014. Вип. 144. С. 35–39.
6. Продащук С. М., Шаповал Г. В., Богомазова Г. Є., Продащук М. В. Дослідження розподілу навантажувально-розвантажувальних ресурсів при виконанні вантажних операцій. *Збірник наукових праць Українського державного університету залізничного транспорту*. 2017. Вип. 172. С. 13–20.
7. Северин О. О., Шуліка О. О., Потаман Н. В. Дослідження залежності сумарних витрат на виконання навантажувально-розвантажувальних робіт від основних показників роботи засобів механізації. *Вісник Східноукраїнського національного університету імені Володимира Даля*. 2018. № 2. С. 198–202.
8. Литвиненко С. Л. Особливості здійснення навантажувально-розвантажувальних робіт при авіаційному перевезенні надважких та негабаритних вантажів. *Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті*. 2012. № 4(дод.). С. 29–30.
9. Марінцева К. В. Методика розрахунку оптимальної кількості навантажувально-розвантажувальних пунктів вантажного складу аеропорту. *Автомобільний транспорт*. 2012. Вип. 31. С. 100–104.
10. Організація і технологія вантажно-розвантажувальних робіт: електор. навч. пос. комбін. використ. / В. П. Кужель, А. А. Кашканов, В. А. Кашканов, О. П. Антонюк. Вінниця: ВНТУ, 2022. 152 с.

Kuchma O.S. RATIONALISATION OF SYSTEMS FOR ORGANISING INTEGRATED MECHANISATION AND AUTOMATION OF LOADING AND UNLOADING OPERATIONS AT AIR AND OTHER TRANSPORT CONNECTION POINTS

The article highlights the importance of loading and unloading operations, their relation to cargo flows and the inseparability of the link with the cargo delivery process. The typical features of loading and unloading operations were described.

The analysis of scientific research made it possible to identify the issues of organising loading and unloading operations, which have been actively studied by domestic and foreign scholars. The progress of comprehensive mechanisation and automation was noted, and various optimisation tasks were studied regarding the allocation of loading and unloading resources and optimisation of work plans.

Despite the urgency of the problem, no relevant approaches have been identified to rationalise the systems for organising comprehensive mechanisation and automation of loading and unloading operations at air and other transport connection points.

Within the scope of the study, the main features of loading and unloading operations were characterised depending on the place of their performance, preparatory and final operations were described, and a conclusion was made about the need to create more optimal technological and organisational solutions to solve the tasks.

Based on the peculiarities of loading and unloading operations revealed in previous studies, the article identifies the features of their performance in the process of cargo transportation by air and with its participation. The article presents a technological scheme of air cargo transportation for departure and another relevant scheme for destination.

The technology of cargo servicing at a transfer airport was characterised and the most progressive aircraft-to-aircraft scheme was outlined. The features of organising the transportation of cargo in aircraft packaging were described in detail. Also, the peculiarities of transporting separate and combined (consolidated) consignments of cargo by air were identified.

Key words: system, comprehensive mechanisation, automation, loading and unloading operations, rationalisation.

Ловська А.О.

Український державний університет залізничного транспорту

Мурад'ян А.О.

Одеський національний морський університет

Рукавішников П.В.

Український державний університет залізничного транспорту

Демидюков О.В.

Одеський національний морський університет

АНАЛІЗ МІЦНОСТІ КРИШКИ ЛЮКА УНІВЕРСАЛЬНОГО НАПІВВАГОНА ПРИ ПЕРЕВЕЗЕННІ В НЬОМУ КОНТЕЙНЕРІВ

В матеріалах статті висвітлюються особливості розрахунку на міцність кришки люка універсального напіввагона при перевезенні в ньому контейнерів. Графічні роботи зі створення просторової моделі кришки люка здійснено в програмному комплексі SolidWorks. Побудову просторової моделі здійснено за альбомом креслень кришки люка. При проведенні дослідження враховано, що для закріплення контейнерів в напіввагоні використовуються стаціонарні фітингові упори. Тому при побудові просторової моделі на полотні кришки люка встановлений фітинговий упор. При цьому модель є монолітною та не враховує зварювальних швів між її складовими.

Розрахунок на міцність здійснено за методом скінчених елементів, який реалізовано в SolidWorks Simulation. У якості розрахункового використано критерій Мізеса (IV теорія міцності). У якості матеріалу виконання кришки люка, а також фітингового упору застосовано низьколеговану сталь марки 09Г2С.

При проведенні розрахунків кришки люка враховано, що на неї діє вертикальне навантаження, яке розглянуто як суму вертикального статичного та динамічного навантажень. Скінчено-елементна модель кришки люка утворювалася ізопараметричними тетраедрами. Їх чисельність визначено графоаналітичним шляхом.

Результати розрахунку показали, що максимальні напруження виникають в петлі кришки люка. При цьому ці напруження склали 366,7 МПа та є вищими за допустимі. Це доводить неможливість такої схеми перевезень контейнерів. Максимальні переміщення в кришці люка зафіксовано у кутовій частині полотна, розміщеній протилежно від фітингового упору і склали 14,5 мм.

Проведені дослідження сприятимуть формуванню рекомендації щодо можливості залучення напіввагонів до контейнерних перевезень.

Ключові слова: кришка люка напіввагона, навантаженість кришки люка, міцність кришки люка, контейнерні перевезення.

Постановка проблеми. Відомо, що залізнична галузь є двигуном розвитку економіки євразійських країн. Для забезпечення стабільності її функціонування важливим є впровадження в експлуатацію транспортних засобів з покращеними характеристиками. Відомо, що найбільш поширеним транспортним засобом в міжнародному сполученні є контейнери. Перевезення контейнерів залізницею здійснюється спеціалізованими вагонами-платформами, обладнаними фітинговими упорами.

У зв'язку з нестачею вагонів-платформ дістало поширення використання напіввагонів для пере-

везень контейнерів (рис. 1 [1]). Для кріплення контейнерів у напіввагоні на їх підлогу монтуються фітингові упори, ідентичні до тих, що використовуються на вагонах-платформах. Здебільшого для таких цілей застосовуються глухоні напіввагони. Однак парк напіввагонів сформований і значною кількістю напіввагонів, підлога яких утворена кришками розвантажувальних люків.

У зв'язку з цим, для можливості перевезень контейнерів у таких напіввагонах, важливим є проведення досліджень в зазначеному напрямку.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Питання дослідження міцності кришок розван-



Рис. 1. Розміщення контейнера у напіввагоні

тажувальних люків напіввагонів розглядалися в чималій кількості публікацій. Так, в роботі [2] для забезпечення схоронності кришок розвантажувальних люків напіввагонів запропоновано удосконалення шляхом посилення конструкції додатковими поясами. Запропоноване рішення обґрунтоване результатами розрахунків на міцність кришки люка. Важливо сказати, що в роботі [2] авторами не приймалося до уваги режиму навантаження кришки люка від фітингового упору для кріплення контейнера.

Для забезпечення схоронності кришки люка напіввагона при найбільш навантажених експлуатаційних режимах в публікації [3] запропоновано заходи щодо її удосконалення. Особливістю кришки люка є те, що вона складається з двох листів, які за периметром взаємодіють через Ш-подібне обв'язування. Простір, який утворюють листи та обв'язування, а також по периметру кришки люка, заповнений пружно (пружно-в'язкою) речовиною. Разом з цим така конструкція кришки люка викликає складнощі при технічному обслуговуванні і ремонті.

Для забезпечення схоронності складових конструкції напіввагона в процесі експлуатації є можливим використання новітніх матеріалів для їх виготовлення. Так, в статті [4] проводиться обґрунтування використання композитних матеріалів для виготовлення настилу підлоги вагона. Наведено відповідне наукове обґрунтування запропонованого рішення. Дане рішення є можливим застосувати і щодо конструкції кришок розвантажувальних люків напіввагонів. Однак авторами роботи не проводилося досліджень в цьому напрямку.

В публікації [5] проводиться аналіз міцності кузова глухонного напіввагона при перевезенні в ньому контейнерів. Розрахунок на міцність реалізовано методом скінчених елементів. Визна-

чено поля розподілення еквівалентних напружень в кузові. Запропоновано рішення щодо покращення міцності кузова напіввагона при перевезенні в ньому контейнерів. Однак авторами не проводилося дослідження міцності кришки люка напіввагона при перевезенні в ньому контейнерів.

Нову конструкцію кришки люка напіввагона запропоновано в статті [6]. Особливістю запропонованої кришки люка є те, що вона має випуклу конфігурація. Таке рішення дозволяє збільшити вантажопідйомність напіввагона на 0,9 т у порівнянні з прототипом. Результати розрахунків на міцність довели раціональність запропонованої конструкції кришки люка. Однак в статті до уваги прийнято тільки один розрахунковий режим її навантаження.

В роботі [1] проведено дослідження навантаженості кузова універсального напіввагона при перевезенні в ньому контейнерів. До уваги прийнято випадок перевезення контейнерів при відсутності їх закріплення відносно кузова. Встановлено, що така схема перевезень не є допустимою. У зв'язку з цим запропоновано пристрій для закріплення контейнерів в кузові напіввагона. Обґрунтовано його конструкційні особливості, а також проведено розрахунок на міцність кузова напіввагона з урахуванням використання даного пристрою. Разом з цим, авторами даної роботи не досліджувалося міцності кришки розвантажувального люка напіввагона при перевезенні в ньому контейнерів.

Аналіз публікацій [1–6] доводить, що питання визначення міцності кришки люка напіввагона при навантаженні її від фітингового упору для кріплення контейнерів є актуальним та потребує дослідження.

Постановка завдання. Метою дослідження є аналіз міцності кришки люка універсального напіввагона при перевезенні в ньому контейнерів. Для досягнення зазначеної мети визначені такі завдання:

- створити просторову модель кришки люка універсального напіввагона;
- провести розрахунок на міцність кришки люка універсального напіввагона.

Виклад основного матеріалу. Для дослідження можливості перевезень контейнерів у напіввагонах, підлога яких утворена кришками люків, доцільним є проведення її розрахунку на міцність. При цьому використано метод скінчених елементів, який реалізовано в SolidWorks Simulation [7, 8]. Графічні роботи зі створення просторової моделі кришки люка здійснено

в SolidWorks (рис. 2). Враховано, що для закріплення контейнерів в напіввагоні використовуються стаціонарні фітингові упори. Тому при побудові просторової моделі на полотно кришки люка встановлений фітинговий упор. При цьому модель є монолітною та не враховує зварювальних швів між її складовими.



Рис. 2. Просторова модель кришки люка з фітинговим упором

При проведенні розрахунків кришки люка враховано, що на неї діє вертикальне навантаження P_e (рис. 3). При цьому дане навантаження розглянуто як суму вертикального статичного та динамічного навантажень. Вертикальне статичне навантаження визначено як $1/4$ ваги бруто контейнера (контейнер типорозміру 1СС).

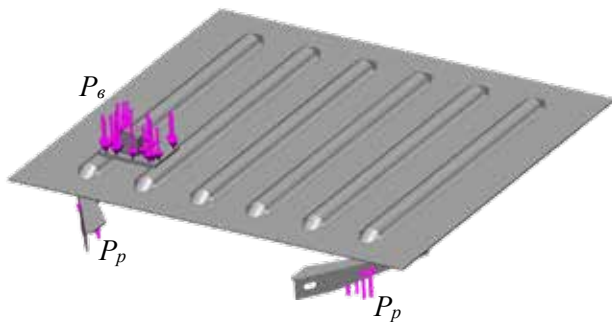


Рис. 3. Розрахункова схема кришки люка

Вертикальне динамічне навантаження розраховано за класичною формулою [9]

$$P_e^d = P_e^{cm} \cdot k_{dv}, \quad (1)$$

де k_{dv} – коефіцієнт вертикальної динаміки. При цьому,

$$k_{dv} = \frac{\bar{k}_{dv}}{\beta} \cdot \sqrt{\frac{4}{\pi} \cdot \ln\left(\frac{1}{1 - P(k_{dv})}\right)}, \quad (2)$$

де \bar{k}_{dv} – математичне очікування;
 β – коефіцієнт розподілу, для вантажних вагонів $\beta = 1,15$;

$P(k_{dv})$ – імовірність коефіцієнта вертикальної динаміки, $P(k_{dv}) = 0,97$.

$$\bar{k}_{dv} = a + 3,6 \cdot 10^{-4} \cdot b \cdot \frac{V - 15}{f_{ct}}, \quad (3)$$

де a – безрозмірний коефіцієнт;

b – коефіцієнт осності, який розраховується за формулою

$$b = \frac{n' + 2}{2 \cdot n'}, \quad (4)$$

де n' – число осей у візку або у групі візків під одним кінцем вагона;

V – конструкційна швидкість;

f_{ct} – статичний прогин ресорного підвішування.

Також при складанні розрахункової схеми кришки люка до запорних кронштейнів прикладалися реакції P_p на дію вертикального навантаження P_e .

Закріплення моделі відбувалося за петлі. У якості матеріалу виконання кришки люка, а також фітингового упору застосовано низьколеговану сталь марки 09Г2С.

Скінчено-елементна модель утворювалася ізопараметричними тетраедрами (рис. 4). Їх чисельність визначено графоаналітичним шляхом і склала 96345. Чисельність вузлів дорівнює 32015. Максимальний розмір елемента становить 40 мм, а мінімальний – 8 мм.

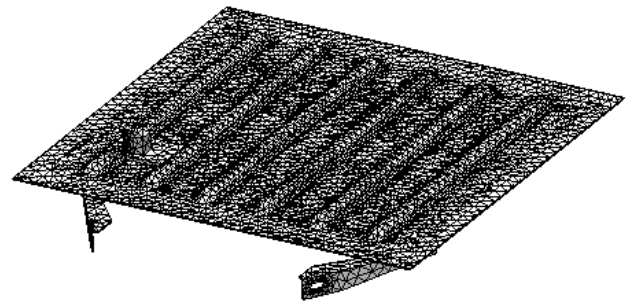


Рис. 4. Скінчено-елементна модель кришки люка

У якості розрахункового застосовано критерій Мізеса (IV теорія міцності). Результати розрахунку наведено на рис. 5–8. При цьому максимальні напруження виникають в петлі кришки люка (рис. 6) і складають 366,7 МПа (рис. 7). Отримані напруження вищі за допустимі [9], що доводить неможливість такої схеми перевезень контейнерів.

Максимальні переміщення в кришці люка виникають у кутовій частині полотна, розміщеній протилежно від фітингового упору і складають 14,5 мм (рис. 8). Такий розподіл полів пере-

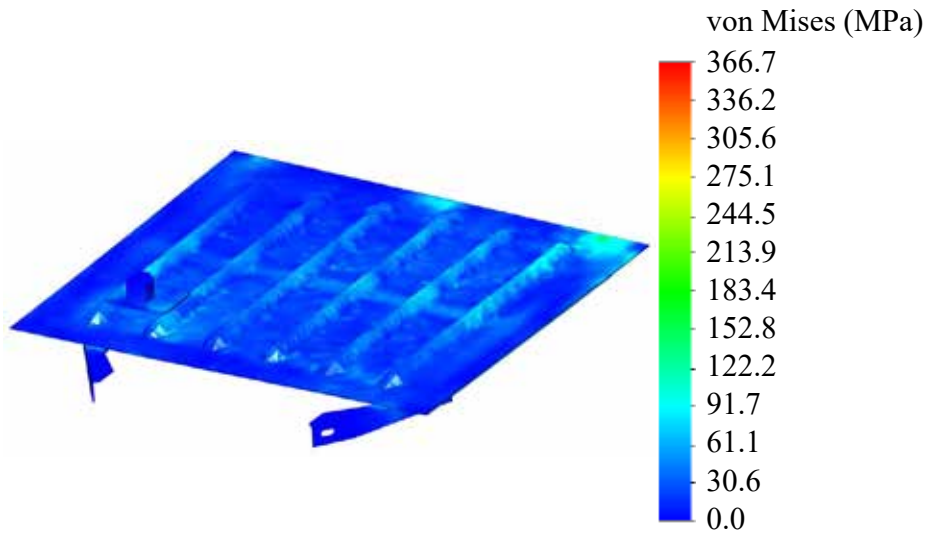


Рис. 5. Напружений стан кришки люка

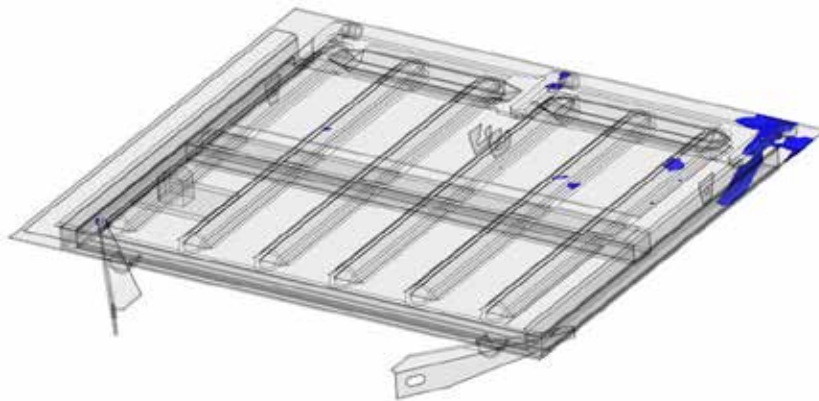


Рис. 6. Найбільш навантажені зони кришки люка

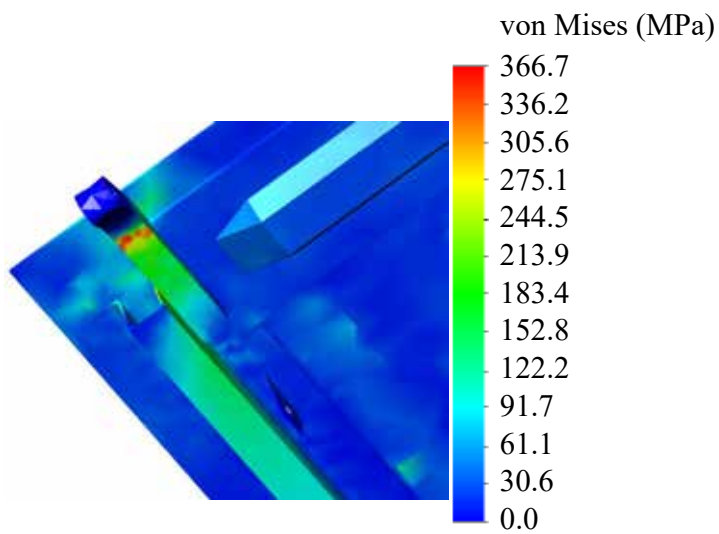


Рис. 7. Напруження в петлі кришки люка

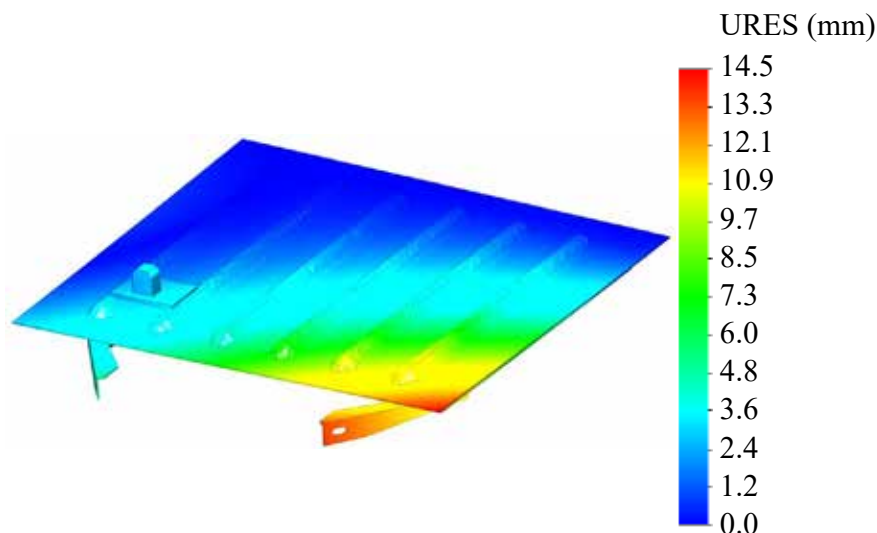


Рис. 8. Переміщення в кришці люка

міцень обумовлений тим, що фітинговий упор, через який передається навантаження на кришку люка, розміщений з протилежного боку від правої частини полотна.

Висновки.

1. Створено просторову модель кришки люка універсального напіввагона. Для моделювання її навантаженості при перевезенні контейнерів на кришку встановлено фітинговий упор. При цьому модель є монолітною та не враховує зварювальних швів між її складовими.

2. Проведено розрахунок на міцність кришки люка універсального напіввагона. При цьому вра-

ховано, що кришка люка сприймає вертикальне навантаження від фітингового упору. Результати розрахунку показали, що максимальні напруження виникають в петлі кришки люка і складають 366,7 МПа. Отримані напруження вищі за допустимі, що доводить неможливість такої схеми перевезень контейнерів. Максимальні переміщення в кришці люка виникають у кутовій частині полотна, розміщеній протилежно від фітингового упору і складають 14,5 мм.

Проведені дослідження сприятимуть формуванню рекомендацій щодо можливості залучення напіввагонів до контейнерних перевезень.

Список літератури:

1. Juraj Gerlici, Alyona Lovska, Glib Vatulia, Mykhailo Pavliuchenkov, Oleksandr Kravchenko, Sebastian Solcansky. Situational adaptation of the open wagon body to container transportation // *Applied Sciences*. 2023. Vol. 13(15), 8605. <https://doi.org/10.3390/app13158605>
2. Р. І. Візняк, І. В. Чепурченко, А. О. Яценко. Особливості визначення експлуатаційних навантажень кузова напіввагона та шляхи удосконалення його конструкції з метою забезпечення міцності і збереження // *Збірник наукових праць Українського державного університету залізничного транспорту*. 2016. Вип. 159. С. 91–97.
3. Oleksij Fomin, Juraj Gerlici, Alyona Lovska, Mykola Gorbunov, Kateryna Kravchenko, Pavlo Prokopenko, Vladimir Hauser. The improved hatch cover construction for universal open box-type wagon from the strength and durability point of view // *MANUFACTURING TECHNOLOGY*. 2019. April 2019, Vol. 19, No. 2. P. 216–221.
4. Zaynitdinov Olmos Irikovich, Ruzmetov Yadgor Ozodovich, Rustam Rahimov, Waail Mahmud Lafta. Development of new polymer composite materials for the flooring of rail carriage. *International Journal of Engineering and Technology*. 2020. Vol. 9(2). P. 378–381.
5. J. Gerlici, G. Vatulia, A. Lovska, D. Skurikhin, J. Harušinec, A. Suchánek, V. Ishchuk // *Transport Means* 2023. Part I. 2023. P. 440–445.
6. Denys Baranovskyi, Maryna Bulakh, Sergey Myamlin, Ivan Kibal. New Design of the Hatch Cover to Increase the Carrying Capacity of the Gondola Car // *Advances in Science and Technology – Research Journal*. 2022. Vol. 16(6). P. 186–191. <https://doi.org/10.12913/22998624/156205>
7. Козяр М. М., Фещук Ю. В., Парфенюк О. В. Комп'ютерна графіка: SolidWorks: навчальний посібник. Херсон: Олді-плюс. 2018. 252 с.

8. Пустюльга С. І., Самостян В. Р., Клак Ю. В. Інженерна графіка в SolidWorks: навчальний посібник. Луцьк: Вежа. 2018. 172 с.

9. ДСТУ ISO 8323:2015. Вантажні контейнери. Контейнери універсальні (інтермодальні) для повітряних і наземних перевезень. Технічні умови та методи випробувань. Київ, 2015.

Lovska A.O., Muradian A.O., Rukavishnikov P.V., Demydiakov O.V. ANALYSIS OF THE STRENGTH OF THE HATCH COVER OF A UNIVERSAL OPEN WAGON WHEN TRANSPORTING CONTAINERS IN IT

The material of the article highlights the features of calculating the strength of the hatch cover of a universal open wagon when transporting containers. A graphical work of the creation of a manhole cover spatial model was carried out in the SolidWorks software. The design of the spatial model was carried out based on the hatch cover drawing documentation. When conducting the research, it was taken into account that stationary fitting stops are used to secure the containers on the open wagon. Therefore, when creating the spatial model, a fitting stop is installed on the hatch cover plate. At the same time, the model is monolithic and does not take into account welding joints between components.

The strength calculation was carried out using the finite element method, which was implemented in the SolidWorks Simulation software. The Mises criterion (The 4th strength theory) was used as the calculation method. Low-alloy steel marked 09G2S is used as material for the hatch cover, as well as for the fitting stop.

When calculating the manhole cover, it is taken into account that it is subjected to the vertical load, which is considered as the sum of the vertical static and dynamic loads. The finite-element model of the manhole cover was formed by an isoparametric tetrahedral. Their number is determined by the grapho-analytical method.

The calculation results showed that the maximum stresses occur in the hinge of the hatch cover. At the same time, these stresses amounted to 366.7 MPa and they are higher than the permissible value. This proves the impossibility of such a container transportation scheme. The maximum displacements in the hatch cover were identified in the corner part of the cover located opposite to the fitting stop, and amounted to 14.5 mm.

The conducted studies will contribute to the formation of recommendations on the possibility of involving open wagons in container transportation.

Key words: *an open wagon manhole cover, the hatch cover load, hatch cover strength, container transportation.*

Ловська А.О.

Український державний університет залізничного транспорту

Павлюченко М.В.

Сумський національний аграрний університет

Тесленко А.В.

Український державний університет залізничного транспорту

АНАЛІЗ НАВАНТАЖЕНОСТІ НЕСУЧОЇ КОНСТРУКЦІЇ НАПІВВАГОНА ПРИ ПЕРЕВЕЗЕННІ В НЬОМУ ГУСЕНИЧНОЇ ТЕХНІКИ

В матеріалах статті проводиться дослідження можливості застосування напіввагонів для перевезень гусеничної техніки. На першопочатковому етапі авторським колективом проведено математичне моделювання повздовжньої навантаженості напіввагона при перевезенні в ньому гусеничної техніки. До уваги прийнято рух вагона у складі поїзда при розрахунковому режимі “ривок”. При цьому враховано, що на передній упор автотрени діє повздовжнє навантаження у 2,5 МН.

На підставі проведених розрахунків встановлено, що максимальне значення прискорення складає 24,4 м/с². Отримана величина прискорення врахована при визначенні міцності несучої конструкції напіввагона. Розрахунок реалізовано за методом скінчених елементів в програмному комплексі SolidWorks Simulation. Для цього створено просторову модель несучої конструкції напіввагона 12-753-01. При створенні просторової моделі враховані елементи конструкції, які жорстко взаємодіють між собою зварюванням або заклепками. Графічні роботи відтворені у SolidWorks. Створення скінчено-елементної моделі здійснено з використанням ізопараметричних просторових тетраєдрів.

Результати розрахунків несучої конструкції напіввагона на міцність встановили, що максимальні напруження складають 276,3 МПа та майже на 30% перевищують допустимі. Дані напруження виникають в зоні розміщення кріпильних скоб. Максимальні переміщення в несучій конструкції напіввагона склали 5,74 мм. Отже перевезення гусеничної техніки за такою схемою є недопустимим.

Проведені дослідження сприятимуть підвищенню ефективності експлуатації залізничного транспорту та стануть корисними напрацюваннями при проектуванні сучасних концептів транспортних засобів багатofункціонального призначення.

Ключові слова: транспортна механіка, напіввагон, ситуаційна адаптація, динамічна навантаженість напіввагона, комбіновані перевезення.

Постановка проблеми. Перспективи техніко-економічного розвитку європейських країн, а також зміцнення їх національної безпеки та оборони зумовлюють підвищення ефективності експлуатації залізничного рухомого складу, як провідної галузі транспортної системи. При цьому потребують розв’язку питання створення спеціалізованого рухомого складу для перевезень гусеничної техніки (сільськогосподарської, військової тощо).

Поповнення вагонного парку в багатьох європейських країнах за останні роки є незначним. У зв’язку з цим виникає необхідність впровадження ефективних конструктивних рішень залізничного рухомого складу для здійснення перевезень вантажів. Одним з найбільш актуальних

варіантів серед таких є ситуаційна адаптація існуючого парку вагонів до відповідних умов експлуатації.

Відомо, що одним з найбільш поширених типів вагонів, які використовуються для перевезень гусеничної техніки є вагони-платформи. Разом з цим, нестача вагонів-платформ в експлуатації під перевезення гусеничної техніки може викликати її простій в очікуванні транспортування. Одним із варіантів вирішення цього питання є адаптація інших типів вагонів під перевезення гусеничної техніки. Тому питання ситуаційної адаптації вантажних вагонів під перевезення гусеничної техніки є актуальним.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Питання ситуаційної адаптації вагонів до пере-

везень завданої номенклатури вантажів є досить актуальними. Наприклад, у науковій публікації [1] запропоновано модернізацію залізничного вагона, яка сприятиме можливості перевезень контейнерів в ньому. Висвітлено конструкційні особливості запропонованої модернізації, а також результати розрахунку на міцність рами, які підтвердили ефективність її використання. Однак автори даної роботи обмежилися одним типом вагону – вагоном-платформом і не проводили досліджень щодо можливості адаптації її конструкції до перевезень гусеничної техніки.

Для адаптації напіввагона до перевезень вантажів, які мають висоту, що перевищує висоту кузова, в роботі [2] запропоновано його удосконалення. Дане удосконалення полягає у використанні висувного елемента – штанги з регульованою висотою. Зазначено, що дане удосконалення підвищить безпеку перевезень вантажів залізницею. Разом з цим, авторами не розглядалася можливість закріплення гусеничної техніки за такою схемою.

З метою можливості перевезень контейнерів в напіввагонах в публікації [3] запропоновано використання проміжного адаптера для їх закріплення в кузові. Даний адаптер являє собою зйомну раму, яка може функціонувати як модульна транспортна одиниця. В роботі наведені результати розрахунку на міцність кузова напіввагона за умови перевезень в ньому контейнерів, закріплених за допомогою адаптера. Доведено, що така схема закріплень контейнерів є доцільною. Однак автори не розглядали питань ситуаційної адаптації напіввагонів до перевезень гусеничної техніки.

Особливості конструкції залізничного вагона, призначеного для перевезень великовагових вантажів висвітлюються у статті [4]. Зазначено гіпотези та припущення прийняті при проектуванні даного вагона. Наведено результати визначення його напруженого стану при основних режимах експлуатації. Однак не зазначено можливості перевезень гусеничної техніки на даному вагоні, що підвищило б ефективність його використання.

Конструкцію вантажного вагона для перевезень колісної техніки запропоновано авторами роботи [5]. Цікавість конструкції даного вагона полягає у тому, що є можливість перевантаження автомобілів за системою ACTS. Для цього вагон має спеціальну поворотну раму. Разом з рядом переваг даної конструкції вагона, авторами не оговорено можливості перевезень на ньому гусеничної техніки.

В роботі [6] проаналізовано можливість перевезення контейнерів у напіввагоні, а також запропоновано рішення щодо ситуаційної адаптації напіввагона до контейнерних перевезень. Разом з цим, питанню дослідження можливості перевезень гусеничної техніки в напіввагонах авторами уваги не приділялося.

Проаналізовані літературні джерела дозволяють зробити висновок, що дослідження, присвячені ситуаційній адаптації напіввагонів до перевезень гусеничної техніки є актуальними та потребують розвитку.

Постановка завдання. Метою дослідження є визначення динамічної навантаженості та міцності несучої конструкції напіввагона при перевезенні в ньому гусеничної техніки.

Виклад основного матеріалу. Для перевезень гусеничної техніки залізницею можливим є залучення для цих цілей напіввагонів з торцевими дверима. Таким чином завантаження гусеничної техніки може здійснюватися через відкриті торцеві двері. Разом з цим, для її кріплення в напіввагоні необхідно передбачити спеціальні кріпильні скоби (рими). Для дослідження можливості перевезень гусеничної техніки в напіввагоні проведено відповідні розрахунки. У якості прототипу розглянуто напіввагон моделі 12-753-01. Торцеві стіни даного напіввагона утворені двостувковими дверима.

У якості прикладу враховано, що гусенична транспортна одиниця (ГТО) має масу 24 т.

Для визначення динамічних навантажень, які будуть діяти на несучу конструкцію напіввагона, завантаженого гусеничною технікою проведено математичне моделювання його динамічної навантаженості у повздовжній площині. До уваги прийнято рух вагона у складі поїзда при розрахунковому режимі “ривок” [7]. Враховано, що на передній упор автозчепу діє повздовжнє навантаження у 2,5 МН. Розрахункову схему напіввагона наведено на рис. 1.

Математична модель, яка характеризує переміщення системи в повздовжній площині при “ривку” має вигляд

$$\begin{cases} M_B \cdot \ddot{q}_1 = P_n - (F_{mp} \cdot \text{sign}(\dot{q}_1 - \dot{q}_2)), \\ M_T \cdot \ddot{q}_2 = (F_{mp} \cdot \text{sign}(\dot{q}_1 - \dot{q}_2)), \end{cases} \quad (1)$$

де M_B – маса бруття напіввагона;

P_n – сила, яка діє на передні упори автозчепу при “ривку”;

F_{mp} – сила тертя між підлогою напіввагона та ГТО;

M_T – маса ГТО.

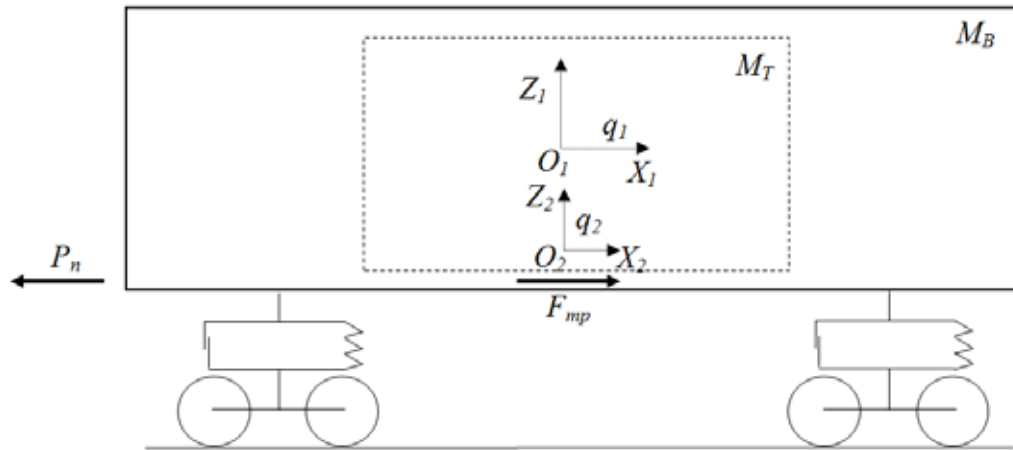


Рис. 1. Розрахункова схема напіввагона

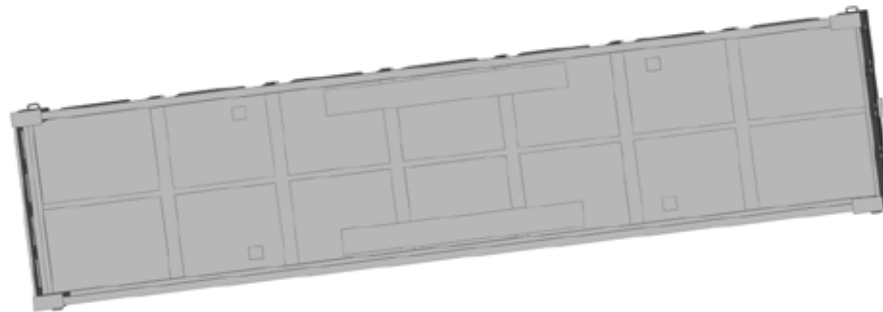


Рис. 2. Розміщення накладок в напіввагоні

Розв’язок математичної моделі здійснено в MathCad за методом покрокової ітерації Рунге-Кутта [8].

При цьому визначення узагальненого прискорення здійснено у масиві $ddq_{j,i}$:

$$ddq_{j,1} = \frac{P_n - (F_{FR} \cdot \text{sign}(y_2 - y_4))}{M_W}, \quad (2)$$

$$ddq_{j,2} = \frac{(F_{FR} \cdot \text{sign}(y_2 - y_4))}{M_T}, \quad (3)$$

де $y_1 = q_1$; $y_2 = \dot{q}_1$; $y_3 = q_3$; $y_4 = \dot{q}_3$.

Початкові умови, переміщення та швидкості, покладені близькими до нуля [9]. На підставі проведених розрахунків отримано, прискорення, яке діє на напіввагон при “ривку”. Максимальне значення прискорення склало $24,4 \text{ м/с}^2$.

Розрахована величина прискорення врахована при визначенні міцності несучої конструкції напіввагона. Для цього створено просторову модель несучої конструкції напіввагона 12-753-01. Графічні роботи відтворені у SolidWorks [10, 11]. При створенні просторової моделі враховані еле-

менти конструкції, які жорстко взаємодіють між собою зварюванням або заклепками. На підлогу напіввагона встановлювалися накладки, які імітують зони взаємодії гусениць транспортної одиниці з напіввагоном (рис. 2).

При складанні розрахункової схеми (рис. 3) до цих накладок прикладалося вертикальне навантаження P_e від ваги бруто ГТО, а також сила тертя P_{mp} , що виникає між гусеницями та підлогою напіввагона.

Також на підлогу встановлювалися чотири накладки прямокутної форми, які імітують плити кріпильних скоб для фіксації стропів, що утримують ГТО від переміщень при перехідних режимах руху поїзда. До цих плит прикладалося навантаження від стропів $P_{кр}$, яке розкладалося на дві складові – вертикальну та горизонтальну. Кут нахилу строба прийнято рівним 45° . До передніх упорів автозчепу прикладалося повздовжнє навантаження P_n у $2,5 \text{ МН}$ [7], що імітувало режим “ривок”. З протилежного боку вагона це навантаження врівноважувалося відповідними реакціями, прикладеними до передніх упорів автозчепу.

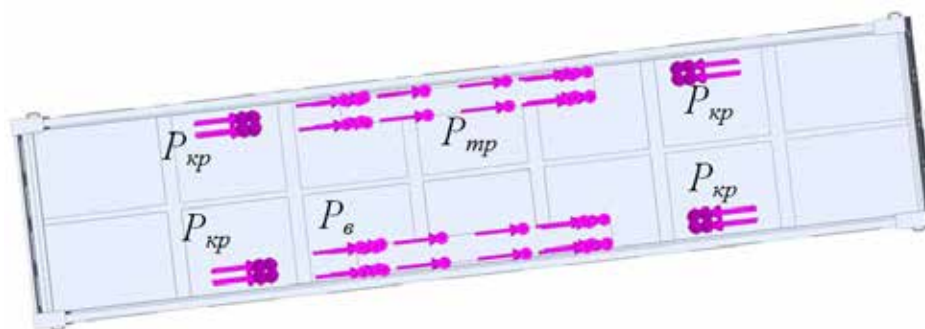


Рис. 3. Розрахункова схема несучої конструкції напіввагона

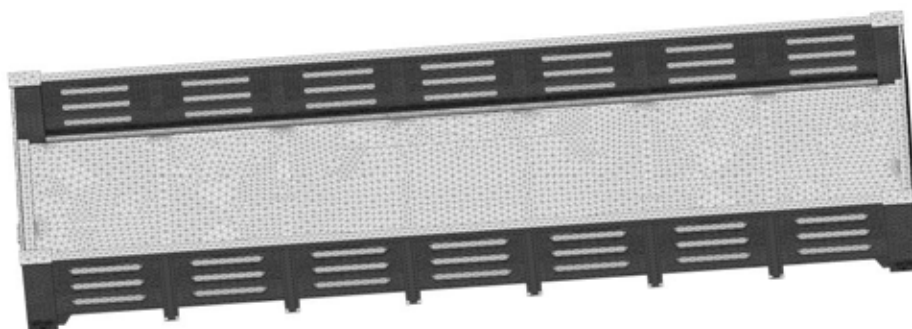


Рис. 4. Скінчено-елементна модель несучої конструкції напіввагона

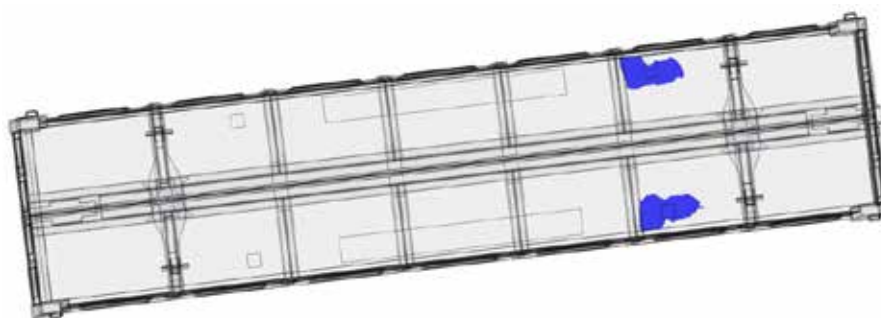


Рис. 5. Найбільш навантажені зони в несучій конструкції напіввагона

До горизонтальних поверхонь п'ятників вагона прикладалися зв'язки, які імітують його обпирання на візки. При цьому застосовувалося жорстке заземлення. Створення скінчено-елементної моделі здійснено за допомогою тетраєдрів (рис. 4). Модель утворена 390767 елементами та 127755 вузлами. Максимальний розмір елемента склав – 100 мм, а мінімальний – 20 мм. Оптимальне значення елементів моделі визначено графоаналітично.

У якості матеріалу несучої конструкції напіввагона призначено низьколеговану сталь 09Г2С [7]. Ця марка сталі є типовою для виготовлення несучих конструкцій вагонів.

За результатами проведених розрахунків встановлено, що максимальні напруження в несучій

конструкції напіввагона виникають в зонах встановлення кріпильних скоб з протилежного за ходом руху боці вагона (рис. 5).

Розрахункові значення отриманих напружень майже на 30% перевищують допустимі і складають 276,3 МПа (рис. 6).

Максимальні переміщення в несучій конструкції напіввагона зафіксовано також в зонах розміщення кріпильних скоб з протилежного за ходом руху напрямку і склали 5,74 мм (рис. 7).

На підставі проведених розрахунків можна зробити висновок, що для безпеки перевезень гусеничної техніки в напіввагонах необхідним є адаптація їх конструкції до взаємодії з засобами закріплення.

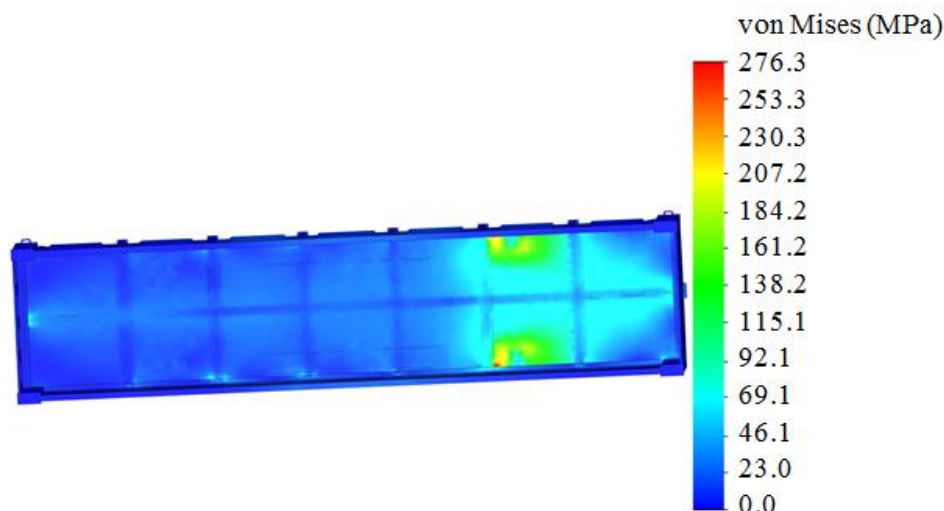


Рис. 6. Напружений стан несучої конструкції напіввагона

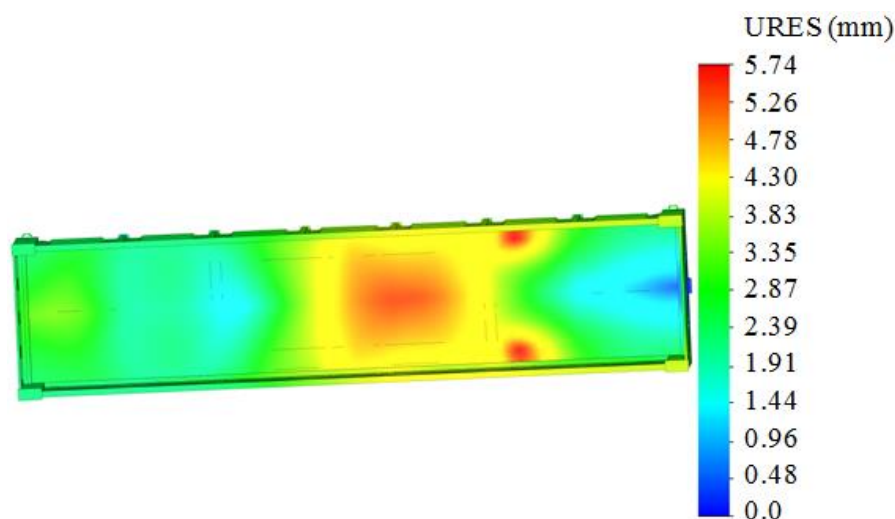


Рис. 7. Переміщення в несучій конструкції напіввагона

Висновки.

1. Проведено математичне моделювання повздовжньої навантаженості напіввагона при перевезенні в ньому гусеничної техніки. До уваги прийнято режим руху напіввагона у складі поїзда – “ривок”. Максимальне значення прискорення, яке діє на несучу конструкцію напіввагона склало $24,4 \text{ м/с}^2$. Отримана величина прискорення врахована при розрахунках на міцність несучої конструкції напіввагона.

2. Результати розрахунків несучої конструкції напіввагона на міцність показали, що максимальні

напруження виникають в зонах встановлення кріпильних скоб і складають $276,3 \text{ МПа}$. Отримані напруження майже на 30% перевищують допустимі. Максимальні переміщення в несучій конструкції напіввагона зафіксовано також в зонах розміщення кріпильних скоб з протилежного за ходом руху напрямку і склали $5,74 \text{ мм}$.

Проведені дослідження сприятимуть підвищенню ефективності експлуатації залізничного транспорту та стануть корисними напрацюваннями при проектуванні сучасних концептів транспортних засобів багатofункціонального призначення.

Список літератури:

1. V. Shaposhnyk, O. Shykunov, A. Reidemeister, M. Leontii, O. Potapenko. Determining the possibility of using removable equipment for transporting 20- and 40-foot-long containers on an universal platform wagon // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. 2021. Vol. 1(7 (109)). P. 14–21. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2021.225090>

2. A. Reidemeister, L. Muradian, V. Shaposhnyk, O. Shykunov, O. Kyryl'chuk, V. Kalashnyk. Improvement of the open wagon for cargoes which implyloading with a "hat" // IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering. 2020. Vol. 985, 012034. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/985/1/012034>
3. Juraj Gerlici, Alyona Lovska, Glib Vatulia, Mykhailo Pavliuchenkov, Oleksandr Kravchenko, Sebastian Solcansky. Situational adaptation of the open wagon body to container transportation // Applied Sciences. 2023. Vol. 13(15), 8605. <https://doi.org/10.3390/app13158605>
4. Divya Priya G., Swarnakumari A. Modeling and analysis of twenty tonne heavy duty trolley // Intern. J. of Innovative Technology and Research. 2014. Vol. 2. No. 6. P. 1568–1580.
5. Wiesław Krasoń, Tadeusz Niezgodą, Michał Stankiewicz. Innovative Project of Prototype Railway Wagon and Intermodal Transport System // Transportation Research Procedia. 2016. Vol. 14. P. 615–624.
6. J. Gerlici, G. Vatulia, A. Lovska, D. Skurikhin, J. Harušinec, A. Suchánek, V. Ishchuk. The Strength of the Open Wagon Body when Transporting Containers // Proceedings of 27th International Scientific Conference. Transport Means 2023, Part I, 2023, October 4–6, Kaunas, Lithuania. P. 440–445.
7. ДСТУ ISO 8323:2015. Вантажні контейнери. Контейнери універсальні (інтермодальні) для повітряних і наземних перевезень. Технічні умови та методи випробувань. Київ, 2015.
8. Богач І. В., Краковецький О. Ю., Килик Л. В. Чисельні методи розв'язання диференціальних рівнянь засобами MathCad: Навчальний посібник. Вінниця, 2020. 106 с.
9. Lovskaya Alyona. Assessment of dynamic efforts to bodies of wagons at transportation with railway ferries. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. 2014. Vol. 3, Issue 4. P. 36–41. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2014.24997>
10. Козяр М. М., Фещук Ю. В., Парфенюк О. В. Комп'ютерна графіка: SolidWorks: навчальний посібник. Херсон: Олді-плюс. 2018. 252 с.
11. Пустюльга С. І., Самостян В. Р., Клак Ю. В. Інженерна графіка в SolidWorks: навчальний посібник. Луцьк: Вежа. 2018. 172 с.

Lovska A.O., Pavliuchenkov M.V., Teslenko A.V. ANALYSIS OF LOADING OF THE BEARING STRUCTURE OF AN OPEN WAGON WHEN TRANSPORTING TRACKED MACHINERY

In the materials of the article, a study of the possibility of using open wagon for the transportation of tracked machinery is carried out. At the initial stage, the author's team carried out mathematical modeling of the longitudinal load of an open wagon when transporting tracked machinery in it. The movement of the wagon as part of the train is taken into account in the "jerk" calculation mode. At the same time, it is taken into account that a longitudinal load of 2.5 MN acts on the front stop of the auto coupling.

Based on the calculations, it was established that the maximum acceleration value is 24.4 m/s². The obtained acceleration value is taken into account when determining the strength of the bearing structure of the open wagon. The calculation was implemented using the finite element method in the SolidWorks Simulation software complex. For this, a spatial model of the bearing structure of the open wagon 12-753-01 was created. When creating a spatial model, structural elements that rigidly interact with each other by welding or rivets are taken into account. Graphic works are reproduced in SolidWorks. The finite element model was created using isoparametric spatial tetrahedra.

The results of strength calculations of the bearing structure of the open wagon established that the maximum stresses are 276.3 MPa and almost 30% exceed the allowable ones. These stresses occur in the area where the fastening brackets are placed. The maximum displacements in the supporting structure of the open wagon amounted to 5.74 mm. Therefore, the transportation of tracked machinery according to such a scheme is inadmissible.

The conducted research will contribute to the improvement of the efficiency of railway transport operation and will be a useful experience in the design of modern concepts of multi-purpose vehicles.

Key words: transport mechanics, open wagon, situational adaptation, dynamic loading of an open wagon, combined transportation.

Лук'янченко О.Ю.

Черкаський державний технологічний університет

Підгорний М.В.

Черкаський державний технологічний університет

ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ФУНКЦІОНУВАННЯ АВТОМОБІЛІВ ОПЕРАТИВНИХ СЛУЖБ ШЛЯХОМ ЗАСТОСУВАННЯ ПРИНЦИПІВ ІНФОРМАЦІЙНО-ЛОГІСТИЧНИХ СИСТЕМ

Дослідження стосуються питань, пов'язаних із технічним забезпеченням оперативних служб країни, насамперед спеціальним рухомим складом, від ефективності використання якого залежить ефективність та якість реагування на техногенні та соціальні виклики (надзвичайні ситуації), кількість яких збільшується, форми прояву стають все більш багатограними, а наслідки від них мають тенденцію до зростання важкості.

В статті визначено, що багатогранність задач, для вирішення яких при реагуванні на надзвичайні ситуації застосовуються спеціальні транспортні засоби, і, в першу чергу, оперативні автомобілі, викликає необхідність застосування високого рівня інформатизації технічних, технологічних, управлінських та організаційних процесів, пов'язаних з усіма етапами їх життєвого циклу.

Розкрито необхідність формування інформаційно-логістичних систем, наявність яких є підґрунтям для формування системних властивостей автомобілів оперативних служб на етапі проектування та конструювання, а також розробки відповідних моделей використання за призначенням на етапі експлуатації.

З'ясовано, що ефективно управління технічними засобами в процесі реагування на надзвичайні ситуації та мінімізації їх наслідків є одним із способів підвищення ефективності оперативної діяльності. Особливо це стосується технічного забезпечення оперативних служб, наприклад, оперативних транспортних засобів.

У статті розкрито, що процедура та алгоритми реагування на відповідну ситуацію можуть бути розглянуті не як системний процес, а як вихідний фактор, який характеризує результативну оцінку певних дій оперативної служби, тобто відбувається осистемлення кінцевого результату процедури реагування, що включає в себе аналіз ефективності транспортної складової та її вплив на результати реагування на надзвичайну подію.

Аналіз процедури реагування оперативними службами на виклик дозволяє стверджувати, що характер відповідних дій та кінцевий результат мають ознаки процедури обслуговування, але послуга, що надається, повинна носити характер безвідмовності, що викликає підвищені вимоги до транспортної і технічної надійності оперативних транспортних засобів.

Доведено, що ефективно та якісно оперативне реагування на ситуацію, враховуючи забезпечення виконання оперативним автомобілем транспортної та технологічної складових, при найкоротших часових показниках в умовах надання послуги, що має характер безвідмовної, вимагають поетапного або комбінованого розв'язання підзадач на відповідних рівнях. Наприклад, збільшення середньої швидкості руху, скорочення часу прибуття першого підрозділу оперативної служби до місця виклику за рахунок поліпшення як технічної так і інформаційної складових системи оперативної служби, мінімізація помилок у потоці інформації під час надання послуг тощо.

Ключові слова: інформаційно-логістичні системи, життєвий цикл, системне моделювання, автомобілі оперативних служб, сервісна послуга.

Постановка проблеми. На сучасному етапі спостерігається тенденція до збільшення прямих та непрямих збитків від різних видів надзвичайних ситуацій, в тому числі, пов'язаних з бойовими діями на території держави.

Дедалі ширше застосування технічного забезпечення, зокрема транспортних засобів, в проєктах управління процесами запобігання та ліквідації надзвичайних ситуацій викликає необхідність пошуку нових підходів до забезпечення належної

ефективності використання їх за призначенням [1, 5]. Дієвим напрямком поліпшення ефективності та якості діяльності оперативних служб є ефективне управління технічними засобами в процесі реагування на надзвичайні ситуації. І в першу чергу така діяльність поширюється на оперативні автомобілі, які є ключовим видом технічного озброєння всіх видів оперативних служб. Сучасний рівень розвитку і вдосконалення об'єктів нової техніки та автоматизація відповідних процесів на всіх етапах їх життєвого циклу сприяли появі цілого ряду нових викликів при розробці та реалізації пов'язаних з цим проєктів. Представлення технічних об'єктів у зазначених проєктах реалізується через складну систему у взаємодії з двома зовнішніми макросистемами: соціумом та середовищем цільового використання. Розвиток зазначених макросистем відбувається завдяки властивим ним внутрішнім механізмам, що передбачає новий рівень взаємодії, який ґрунтується на побудові відповідних інформаційних систем, які забезпечують процеси проєктування, створення, управління та використання за призначенням об'єктів сучасної технічної системи оперативних служб, в тому числі оперативних автомобілів. Методологія визначення та вирішення нових задач в управлінні зазначеними проєктами повинна ґрунтуватись на аналізі та синтезі багаторівневої та багатоетапної техніко-економічної структури, якою є життєвий цикл (ЖЦ) автомобіля оперативної служби (АОС), і який впорядковує у часі і просторі систему створення, виробництва, функціонування за призначенням, технічних впливів та утилізації АОС.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Задачі підвищення ефективності функціонування оперативних служб, в тому числі за рахунок забезпечення їх високофункціональними транспортними засобами, є об'єктом дослідження значного ряду робіт [1-4, 7]. Проте, більшість таких досліджень є результатом роботи спеціалістів конкретної галузі оперативної служби, що призводить до підвищення ефективності роботи автомобіля на місці виклику шляхом покращення функціональності спеціальної надбудови. При цьому транспортній складовій діяльності оперативних служб, що впливає на оперативність прибуття до місця виклику особового складу, та доставки необхідного обладнання приділяється набагато менше уваги.

З цим пов'язана необхідність комплексного дослідження транспортного процесу акції реагування на надзвичайну подію, що ґрунтується

на теорії руху матеріальних потоків та аналізі умов використання АОС за призначенням, що може бути забезпечено використанням принципів інформаційно-логістичних підходів

Постановка завдання. Забезпечення найбільшої ефективності АОС при використанні за призначенням та можливості їх комплексного застосування для вирішення багатогранних задач технічного, економічного та соціального характеру вимагає вирішення таких проблем, як інформатизація процесів виробництва ЖЦ оперативних транспортних засобів, формування системних характеристик АОС, створення моделей ЖЦ та інформаційних структур для їх реалізації. Забезпечення ефективного управління такими аспектами експлуатації АОС є одним з найважливіших напрямків реалізації їх технічного рівня у відповідних проєктах, що вимагає застосування нових підходів та впровадження сучасних інформаційних технологій в процес управління. Показники, що характеризують якість та ефективність використання АОС базуються на множині їх властивостей, зокрема таких, як властивості побудови, властивості функціонування, властивості розвитку та адаптації. Властивості, що входять в зазначені групи повинні бути оцінені відповідними параметрами за допомогою цільових показників, що характеризують системні можливості АОС та рівень їх реалізації в експлуатаційному середовищі.

Тому, актуальними є питання вирішення задач інформатизації виробничих процесів ЖЦ АОС, системне формування їх властивостей, розроблення моделей ЖЦ та структуризація інформаційної логістики в процесі функціонування оперативних служб для реалізації відповідних задач.

Виклад основного матеріалу. Актуальність використання транспортно-логістичних підходів та методів в оперативній діяльності відповідних служб пов'язана із тим, що транспортна складова має вирішальне значення для зменшення часових характеристик акції реагування. При цьому сама акція має характер сервісної послуги, тобто може спиратись на засади теорії обслуговування, причому сама «послуга» повинна розглядатись, як безвідмовна. У зв'язку із зазначеним та збільшенням кола задач, що вирішуються оперативними службами, розширюється і сфера завдань, виконання яких потребує забезпеченості достатньо великим спектром об'єктів технічного озброєння. В свою чергу, зростання вимог до рівня технічного забезпечення викликає ризики, пов'язані із зростанням складності технічних засобів та їх конструктивної перевантаженості. Особливо це

стосується оперативних автомобілів, які технічно і технологічно забезпечують транспортну та аварійно-рятувальну складові комплексу операцій по реагуванню на надзвичайну ситуацію та ліквідацію їх наслідків.

Рівень складності зразків відповідних технічних засобів, зокрема і АОС, може бути визначена за допомогою математичної залежності, наведеної в роботі [6]:

$$S = \sum_{j=1}^n S_j \cdot K_j \cdot (1 + v \cdot \alpha), \quad (1)$$

де: S_j – рівень складності окремих системи ($j = 1, \dots, n$); K_j – кількість елементів, що входять в систему; v – коефіцієнт, який оцінює рівень складності зв'язків між елементами порівняно до складності елементів системи;

$$\alpha = \frac{M^*}{N \cdot (N - 1)}$$

– відносна кількість зв'язків, які реалізовані в системі;

M^* – фактична кількість реалізованих зв'язків;

$N \cdot (N - 1)$ – максимально можлива кількість зв'язків між системними елементами;

$$N = \sum_{j=1}^n K_j$$

– кількість системних елементів.

Зазначений показник рівня складності може бути використаний для оцінки АОС, як складної технічної системи з точки зору можливості ним реалізації технічних параметрів в умовах експлуатації.

Дослідження діяльності підрозділів оперативних служб з точки зору управління операціями, які потребують застосування спеціалізованого автотранспорту, одну із системних профільних цілей можна сформулювати як «виконання транспортного процесу (з усіма, притаманними йому складовими) для надання безвідмовної послуги у вигляді реагування на відповідну подію.

Деревоподібна структура системи цілей [7] використання АОС тотожно наведеної в роботі [7].

Рівень задач, які повинен реалізовувати АОС відповідає другому рівню системної моделі, що являє собою систему або сукупність задач [6]. Формально, кожна задача Z формально може бути представлена наступним чином:

$Z = (\sigma(Z), R_z)$, де $\sigma(Z)$ – (перелік) множина вихідних даних задачі Z ;

R_z – множина результатів розв'язання цих задач Z .

Множиною задач E_z також задано функції: M, T, B і K для кожної задачі $Z \in E_z$, які визначають:

$T(Z)$ – метод вирішення задачі;

$B(Z)$ – застосовані обмеження при вирішенні задачі Z . Кожна задача має свою множину обмежень.

$K(Z)$ – оцінювання результатів вирішення задачі Z .

Відносно $B(Z)$ і $K(Z)$ приймаються рішення щодо рівня задач.

Третій рівень є рівнем алгоритмів (процесів) проєктування, і представлений у вигляді логіко-динамічної системи (ЛДС) [6].

Використання для програмування ЖЦ автомобілів оперативних служб моделей відповідного класу поєднує в одній критеріальній системі різні показники якості на всіх етапах життєвого циклу АОС. Системна модель формується шляхом об'єднання за заданим алгоритмом локальних моделей окремих технологічних процесів на всіх етапах життєвого циклу АОС.

ЖЦ оперативного автомобіля розглядається як відповідна модель:

$$F \{F_1, F_2, F_3, F_4, F_5\} \quad (2)$$

де F_1, F_2, F_3, F_4, F_5 – відповідно моделі проєктування АОС, виготовлення АОС, функціонування АОС, технічних впливів на АОС та їх утилізації.

Основною метою моделювання ЖЦ автомобілів оперативних служб (як об'єктів нової техніки [6]) – сприяння використанню можливостей обчислювальної техніки для вирішення наукових, технічних, організаційних, управлінських, економічних технологічних і соціальних проблем при створенні перспективних типів і моделей АОС та забезпечення їх ефективності на всіх етапах ЖЦ.

Визначним фактором діяльності оперативних служб є оперативні дії, пов'язані з негайним реагуванням на ситуації, що загрожують життю та здоров'ю, майновому або правовому статусу громадян. Повідомлення, що надходять у диспетчерську відповідної служби у разі виникнення надзвичайної ситуації потребують відповідного реагування. Реагування на виклики забезпечується оперативними підрозділами з використанням наявних на озброєнні АОС [5], а ефективність та якість процесу залежить від часових характеристик реагування на надзвичайну ситуацію.

Ефективне та якісне оперативне реагування на ситуацію, враховуючи забезпечення виконання оперативним автомобілем транспортної та технологічної складових, при найкоротших часових показниках в умовах надання послуги, що має характер безвідмовної, вимагають поетапного або комбінованого розв'язання підзадач на від-

повідних рівнях. Наприклад, збільшення середньої швидкості руху, скорочення часу прибуття першого підрозділу оперативної служби до місця виклику за рахунок поліпшення як технічної так і інформаційної складових системи оперативної служби, мінімізація помилок у потоці інформації під час надання послуг тощо.

Аксіоматика задачі. Вибір елементів автомобіля оперативної служби здійснюється з кінцевої множини елементів, вага яких визначається при вирішенні зовнішнього завдання на проектування автомобіля оперативної служби. Під елементом розуміється комплекс автономного обладнання, здатний виконувати функції необхідної якості.

Вихідні дані задачі містять:

- часові характеристики надання безвідмовної послуги (реагування на ситуацію оперативним підрозділом);
- зв'язок між ефективністю власної безпеки об'єкта та часовими характеристиками реакції на виклик;
- технічні параметри АОС;
- підходи до експлуатації АОС та забезпечення необхідного рівня техніко-економічних показників;
- вимоги та обмеження підсистем АОС;
- результати вирішення проектно конструкторських задач.

Оцінка зазначеного критерію проектування АОС представляється як частина відносних затрат по створенню АОС, залежна від критерію.

Цільова функція представлена як адитивний функціонал від оцінок проектних критеріїв:

$$\Delta \mathcal{E}_{\text{ПРА}} = \sum_{k=1}^m \Delta \mathcal{E}_{\text{ПРА}}^k \quad (3)$$

де $\Delta \mathcal{E}_{\text{ПРА}}^k$ – оцінка k -ї критеріальної оцінки, $k = 1, \dots, m$, проектного критерію.

Обмеження задачі включають вимоги, які виражають наміри керівника проекту на додаток до результатів вирішення зовнішніх завдань.

Місце інформаційної логістики в діяльності оперативних служб. Основними функціями АОС в рамках технічної підтримки оперативних служб є:

- оперативне доправлення персоналу та обладнання для виконання необхідних робіт до відповідної локації;
- забезпечення функціонування доставленого на місце події обладнання при виконанні необхідних завдань;
- за необхідності передислокації, можливість швидкого згортання та розгортання устаткування.

Вирішення зазначених завдань можливе з використанням алгоритмів та принципів функціонування логістичних систем, застосованих при організації перевезень комерційним транспортом [8]. Однак, у зв'язку з різними підходами до характеру послуги, що надається комерційним автотранспортом та АОС (як зазначалося вище, АОС використовуються для забезпечення безвідмовного обслуговування) та різними режимами використання під час здійснення транспортної роботи, логістичні системи, і зокрема їх інформаційні складові, повинні враховувати специфіку функціонування АОС.

Оскільки характер ініціювання дій з ліквідації наслідків надзвичайних ситуацій є випадковим, інформація про рівень відповідних елементів, що впливають на технологічний процес реагування на надзвичайну ситуацію (технічний стан, технічні можливості, технологічно-ресурсне забезпечення конкретного АОС) повинна поетапно надходити до центрів прийняття рішень.

Особливо це стосується задач управління процесами оперативної діяльності відповідних служб, для розв'язання яких використовуються методи, що базуються на відносно значній множині критеріальних функцій, а вихідна управлінська задача зводиться до різновиду однокритеріальної оптимізаційної задачі, що не дає задовільних результатів при прийнятті ефективного рішення. На сучасному етапі для розв'язання задач багатокритеріальної оптимізації широко застосовуються людино-машинні процедури, де на кожному кроці повинна вказуватись перевага багатокритеріальних функцій (рішень).

Для того, щоб ефективно пов'язати у просторі та часі технологічні процеси реагування на надзвичайну ситуацію, необхідно централізувати управління та контроль інформаційних потоків, які гарантують узгоджену роботу керованих ланцюгів надання безвідмовної послуги. Відповідно, розроблення інформаційно-логістичної системи, яка передбачає певну організацію взаємодії контрольного обладнання, комп'ютерної техніки, нормативної документації, довідників та необхідних засобів програмування, гарантуватиме виконання основних функціональних завдань.

На практиці, як правило, при керуванні такими системами, використовується множина критеріїв. У ряді випадків, для спрощення процедури прийняття рішення, існують шляхи зведення задачі до ситуації однокритеріальної оптимізації. Найпростіший спосіб – використання так званого зважування критеріїв. За умови, що

$f_1(x), \dots, f_n(x)$ – множина цільових функцій, які характеризують вагу застосованих критеріїв, кожна з них, за відносною вагою критерію, оцінюється ваговим коефіцієнтом λ_i . Процес зважування критеріїв і пов'язаних з ними цільових функцій $f_1(x), \dots, f_n(x)$ полягає в пошуку єдиного критерію, і, відповідно, однієї цільової функції $f(x) = \lambda_1 f_1(x) + \dots + \lambda_n f_n(x)$.

Інформаційне забезпечення повинно реалізовувати механізм зворотного зв'язку процесів з реагування на надзвичайні ситуації з усіма іншими логістичними підсистемами. Водночас логістично-транспортна система потребує безперервної інформації про транспортно-технічне забезпечення оперативних підрозділів у будь-який проміжок часу, щоб мати можливість приймати управлінські рішення відповідно до змінної обстановки та ресурсного потенціалу оперативних служб. Ця інформаційна складова повністю залежить від стану, в якому перебувають мобільні АОС. На відміну від комерційних транспортних засобів, мобільні АОС знаходяться в постійному використанні, але в одному з наступних п'яти станів: очікування (режим готовності), переміщення до точки виклику (транспортні операції в оперативному режимі), забезпечення роботи доставленого спеціального обладнання (стаціонарні операції), повернення до пункту очікування (неоперативний режим) і технічне обслуговування (відновлення готовності до наступного використання за призначенням).

Незважаючи на детермінований характер цих станів, можливість перебування конкретного АОС в кожному з них підпорядковується імовірнісним законам, що пов'язано з випадковістю надходження повідомлення про надзвичайну ситуацію. Іншими словами, стан, в якому знаходиться АОС, впливає не тільки на його тактико-технічні можливості, але й на забезпечення показників безвід-

мовності. Таким чином, логістична система повинна мати вхідне інформаційне забезпечення щодо перебування i -го оперативного автомобіля в k -му стані (Рис. 1).

Управління реагуванням на надзвичайні ситуації шляхом забезпечення відповідного рівня зв'язків між елементами логістичної інформаційної системи та забезпечення комплексної інтеграції всіх складових управління матеріальними потоками впливає на ефективність і надійність надання безвідмовної послуги. Крім того, впровадження систем моніторингу АОС в реальному часі дозволяє контролювати місцезнаходження і технічний стан оперативних автомобілів та впливати на можливі позаштатні ситуації.

Висновки. Рішення зазначених задач забезпечить розробку ефективної системи моніторингу та управління процесами, пов'язаними з використанням АОС за призначенням. Програмування процесів створення оперативного автомобіля за наявності єдиних проєктно-технічних та функціонально-споживчих підходів за урахуванням особливостей його функціонування є методологічним базисом для забезпечення належного рівня ефективності та якості технологічних процесів, пов'язаних з використанням за призначенням та відновленням ресурсу. Базою для таких систем повинні бути сучасні підходи до управління логістичними процесами засновані на застосуванні геоінформаційних технологій, які забезпечують оптимальний інформаційний потік, аналіз інформації та надання результатів з метою прийняття об'єктивного управлінського рішення. Складність реалізації цих процесів на всіх етапах ЖЦ АОС пов'язана з відсутністю комплексного урахування особливостей функціонування за призначенням оперативних автомобілів, яка обумовлена розділенням відомчої підпорядкованості як виробників, так і користувачів оперативними транспортними засобами.



Рис. 1. Система інформаційного потоку оперативних служб

Перспективи подальших досліджень. Задачі створення та використання за призначенням нових зразків АОС повинні відповідати зростаючим проблемам суспільства щодо забезпечення скорочення часу при реагуванні на різні надзвичайні ситуації. Застосування відповідних інформаційно-логістичних систем, які безпосередньо стосуються транспортної складової функціонування АОС тісно пов'язані з конструктивними та компоувальними рішеннями оперативних автомобілів. Максимальна адаптованість АОС

до виконання ним відповідних транспортних та технологічних процесів при використанні за призначенням залежить від відповідності його конструкції логістичному середовищу цільового використання.

Таким чином, задачі підвищення ефективності використання АОС на пряму пов'язані з вирішенням задач пристосованості його конструкції до здійснення з максимальною ефективністю транспортно-логістичних операцій із застосуванням сучасних інформаційних технологій.

Список літератури:

1. Katuwal, Hari; Calkin, David E.; Hand, Michael S. 2016. Production and efficiency of large wildland fire suppression effort: A stochastic frontier analysis. *Journal of Environmental Management*. 166: 227-236.
2. Sarkar, S.S., Sen, A., Krishnamoorthy, A. et al. Route Planning Service for Emergency Vehicles with Increased Accuracy and Efficiency for Online Platforms. *SN COMPUT. SCI*. 3, 400 (2022).
3. Лаврівський М.З., Зінько Р.В., Лозовий І.С. Формування спеціалізованого контейнера для пожежного автомобіля модульної компоновки. *Науковий вісник: Цивільний захист та пожежна безпека*. 2009. № 2. С. 141-147.
4. Зінько Р.В., Ванкевич П.І., Іваник Є.Г. Методологічні аспекти побудови моделей роботи різнотипної військової техніки на основі подібності графів їх конструкцій. *Озброєння та військова техніка*. 2017. № 1. С. 82-89.
5. Лук'янченко О. Ю., Вільова Д.І. Методичні аспекти формування комплексу вимог до автомобілів оперативних служб // *Вісник Національного транспортного університету*. 2013. № 27. С. 211-216.
6. Тимченко А.А. Основи системного проектування та системного аналізу складних об'єктів. Кн. 2: Основи системного підходу та системного аналізу об'єктів нової техніки: Навч. посібник. – Київ: Либідь, 2004. 288 с.
7. Підгornyий М.В. Методологічні аспекти формування технічного потенціалу пожежно-рятувальних автомобілів // *Пожежна безпека: теорія і практика: збірник наукових праць*. 2013. № 15. С. 124-129.
8. Левковець П.Р., Лук'янченко О.Ю., Зажома В.М. Логістичні підходи до процесів пожежогасіння // *Вісник Національного транспортного університету*. 2009. № 15. С. 107-109.

Lukianchenko O.Yu., Pidhornyy M.V. IMPROVING THE EFFICIENCY OF OPERATIONAL SERVICE VEHICLES BY APPLYING THE PRINCIPLES OF INFORMATION AND LOGISTICS SYSTEMS

The research deals with issues related to the technical support of the country's operational services, primarily with special rolling stock, the effectiveness of which determines the efficiency and quality of response to man-made and social challenges (emergencies), the number of which is increasing, the forms of manifestation are becoming more multifaceted, and the consequences of them tend to increase in severity.

The article determines that the multifaceted nature of the tasks for which special transport means, and, first of all, operational vehicles, are used in responding to emergencies, necessitates the use of a high level of informatisation of technical, technological, managerial and organisational processes associated with all stages of their life cycle.

The necessity of forming information and logistic systems, the presence of which is the basis for the formation of system properties of operational service vehicles at the design and construction stage, as well as the development of appropriate models of intended use at the stage of operation, is revealed.

It has been found that effective management of technical means in the process of responding to emergencies and minimising their consequences is one of the ways to increase the efficiency of operational activities. This is especially true for the technical support of operational services, for example, operational vehicles.

The article reveals that the procedure and algorithms for responding to an emergency situation can be considered not as a systemic process, but as an initial factor characterising the effective assessment of certain actions of an operational service, i.e., the final result of the response procedure is systemised, which includes an analysis of the efficiency of the transport component and its impact on the results of responding to an emergency.

The analysis of the procedure for responding to a call by emergency services suggests that the nature of the relevant actions and the final result have signs of a service procedure, but the service provided should be of a fault-tolerant nature, which causes increased requirements for the transport and technical reliability of operational vehicles.

It is proved that an effective and high-quality operational response to the situation, including ensuring the performance of the transport and technological components by the operational vehicle, at the shortest possible time in the conditions of providing a service that is fault-free, requires a step-by-step or combined solution of subtasks at the appropriate levels. For example, increasing the average speed of traffic, reducing the time of arrival of the first operational service unit to the place of call by improving both the technical and information components of the operational service system, minimising errors in the flow of information during the provision of services, etc.

Key words: *information and logistics systems, life cycle, system modelling, operational service vehicles, service.*

УДК 629.3.014.7+629.3.022.4
DOI <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2024.2/45>

Петров Л.М.

Військова академія (м. Одеса)

Кішянус І.В.

Військова академія (м. Одеса)

Лисий О.В.

Військова академія (м. Одеса)

Верпівський С.М.

Військова академія (м. Одеса)

Малиновський О.А.

Військова академія (м. Одеса)

Нікішин В.А.

Військова академія (м. Одеса)

Шелухін С.В.

Військова академія (м. Одеса)

РОБОТ «ГЕРЕЦЬ» ДЛЯ СТВОРЕННЯ ПРОХОДІВ В МІННИХ ПОЛЯХ В ЗОНІ БОЙОВИХ ДІЙ

Робочий процес військового робота для створення проходів в мінних полях супроводжується навантаженням коліс вільної осі рухливим важелем що дозволяє ходовим колесам кінематично-зв'язаним з колесами вільної осі переміщуватись в заданому напрямку та одночасно направляючим колесам на диски, що формують потік важких дрібних часток. В статті розглянуті питання теоретичного дослідження механічної системи військового робота для створення проходів в мінних полях з пружним накопичувачем енергії для створення потоку важких дрібних часток і прокручування дисків, що формують потік важких дрібних часток і направляючого колеса, що кидає з застосуванням теореми Гюйгенса – Штейнера, а також системи загального рівняння динаміки.

Метою дослідження є створення військового робота для створення проходів в мінних полях з пружним накопичувачем енергії та конструкторсько-технологічної схеми, яка включає «неактивний міст» з пружним прокручуванням осі коліс та накопичуванням потенціальної енергії від додаткового пневматичного резистора.

Наукова та практична значущості роботи полягає в тому, що вперше запропонована теорія військового робота для створення проходів в мінних полях з пружним накопичувачем енергії для підтвердження його руху та технологія для її здійснення, в якій при обертанні коліс вільної осі введено частка енергії від пневматичного резистора.

Методологією дослідження являлося встановити математичний зв'язок між рухливим важелем та обертанням осі від пневматичного резистора.

Результатом є розроблена геометрія військового робота для створення проходів в мінних полях з пружним накопичувачем енергії для підтвердження його руху роботи у циклі руху вільної осі з пружинним накопичувачем, що відповідає руху ходовим колесам між першим і третім веденими мостами.

Цінність проведеного дослідження, результати проведеної роботи дозволять зробити внесок в галузь роботизованої техніки для виконання небезпечних робіт, де присутність людини не обов'язкова.

Запропоновано військовий робот для створення проходів в мінних полях з застосуванням пружного накопичування енергії в ходовій частині.

***Ключові слова:** пневматичний резистор, ходове колесо, направляюче колесо, що розкидає, диски, потік, вільна вісь.*

Постановка проблеми. Провідні держави світу оснащують свої збройні сили сучасними засобами військової техніки в тому числі новітніми зразками техніки і технологіями, які призначені для розмінування мінних полів.

Згідно [1, с. 42-44] сухопутні війська Великобританії використовують систему розмінування "Пітон", яка викидає шланг, начинений вибухівкою великої потужності, на мінне поле, де він вибухає, викликаючи тим самим детонацію мін. Очевидно, що недоліком даного способу розмінування є відсутність детонації мін, які розташовані на певній відстані від заряду через послаблення дії ударної хвилі і продуктів детонації.

В армії Німеччини розроблена система дистанційного виявлення та знешкодження мінних полів MMSR, що об'єднує в себе засоби розвідки та

ліквідації мінних бар'єрів [1, с. 42-44]. Засіб розмінування представляє собою дистанційно керований мінний трал масою 8 т на спеціальній базі, що перевозиться на вантажному автомобілі. Його обладнання дозволяє імітувати магнітні, теплові, акустичні та сейсмічні поля бойових броньованих машин для імітації підриву з неконтактними детонаторами. Міни з детонаторами натискної дії підриваються спеціальними крокуючими пристроями, розташованими попереду трала. Система має середню здатність ефективно прокласти широкий прохід у мінімальному полі шириною до 2,8 м при швидкості руху до 7 км/год. Підрив мін і характер пошкоджених зарядів фіксуються відеокамерами, встановленими на машині управління. Крім того, у ФРГ розроблена малогабаритна радіокерована двох вісна машина розмінування КМР-1 «Кобра» з дальністю управління до 2 км.

В армії Німеччини розроблена система дистанційного виявлення та знешкодження мінних полів MMSR, що об'єднує в себе засоби розвідки та ліквідації мінних бар'єрів [1, с. 42-44]. Засіб розмінування представляє собою дистанційно керований мінний трал масою 8 т на спеціальній базі, що перевозиться на вантажному автомобілі. Його обладнання дозволяє імітувати магнітні, теплові, акустичні та сейсмічні поля бойових броньованих машин для імітації підриву з неконтактними детонаторами. Міни з детонаторами натискної дії підриваються спеціальними крокуючими пристроями, розташованими попереду трала. Система має середню здатність ефективно прокласти широкий прохід у мінімальному полі шириною до 2,8 м при швидкості руху до 7 км/год. Підрив мін і характер пошкоджених зарядів фіксуються відеокамерами,

встановленими на машині управління. Крім того, у ФРГ розроблена малогабаритна радіокерована двох вісна машина розмінування КМР-1 «Кобра» з дальністю управління до 2 км.

На (рис. 1) показана машина розмінування Таком 1/3.



Рис. 1. Машина розмінування Таком 1/35 при розмінуванні

На (рис. 2) показана машина розмінування MV4 DOK.



Рис. 2. Машина розмінування MV4 DOK

На (рис. 3) показана машина розмінування DOK-ING MV-10.



Рис. 3. Машина розмінування DOK-ING MV-10

Провідні технологічно розвинені країни (США, Великобританія, Франція, Китай, Ізраїль, Південна Корея) активно розробляють робото-технічні комплекси, здатні з високим ступенем автономності вести бойові дії без участі людини. Так, в армії США планується до 2030 р. довести частку безпілотних засобів до 30% від загального складу бойових машин. За оцінками американських військових фахівців, бойові можливості підрозділів, оснащених робото-технічними комплексами, зростуть в 2...2,5 рази [1, с. 42–44]. Робото-технічний засіб пророблення проходів в мінно-вибухових загородженнях – це конструктивно відокремлений без екіпажний виріб військової техніки, призначений для виявлення мін і вибухонебезпечних предметів та їх знищення вибуховим (механічним) способом при автономному або дистанційному управлінні.

Аналіз розвитку робототехніки в арміях іноземних держав (США, Німеччини, Великобританії) показує, що в них активно ведуться роботи зі створення нових високоефективних протимінних

систем, здатних виявляти загородження і зразу проведення розмінування.

На (рис. 4) показано загальний вигляд машини розмінування ARMTRAC 400.

На (рис. 5) показано машину розмінування ARMTRAC 400 при виконанні технічного процесу на місцевості.

На (рис. 6) показано машина розмінування Vozena – 5.

На (рис. 7) показана машина розмінування Vozena – 5 при виконанні технічного процесу на місцевості.

В Україні розроблено пристрої, вибухові речовини та запропоновано спосіб приготування водо наповненого спіненого вибухового композиту безпосередньо на місці проведення робіт. Застосування даного способу можливо для розмінування місцевості шляхом човникового переміщення пінного ствола уздовж фронту робіт протяжністю 100–200 м за один цикл з покриттям шару піно суспензії 50–70 мм смужки ґрунту шириною 5–10 м і подальшим підривом вибухового композиту ниткою ДШ. Запропоновано для розміну-



Рис. 4. Загальний вигляд машини розмінування ARMTRAC 400



Рис. 5. Машина розмінування ARMTRAC 400 на розмінуванні



Рис. 6. Машина розмінування Vozena – 5



Рис. 7. Машина розмінування Vozena – 5 на розмінуванні

вання пересіченої місцевості та для розмінування мінних полів [3, с. 1–3]. Не заперечуючи новизну і оригінальність даного методу, відмітимо ряд недоліків, які вказують на необхідність доопрацювання методу в режимі дослідно-конструкторської роботи: для формування шару однорідного вибухового композиту необхідна ретельна підготовка поверхні ґрунту (убрати рослинне покриття, сторонні предмети); для цього необхідний роботизований пристрій для підготовки поверхні ґрунту; або визначити рецептуру ВР, яка буде детонувати навіть на рослинному покритті; розробити спосіб переміщення пінного ствола; розробити спосіб і обладнання для подачі і укладки шнура, який детонує в сформований шар ВР по всій його довжині для забезпечення стабільної детонації; оцінити надійність детонації міни через шар ґрунту та дію повітряної і сейсмічної хвилі на докільця і допустиму масу заряду.

Постановка завдання. Метою статті є створення військового робота для створення проходів в мінних полях з пружним накопичувачем енергії та конструкторсько-технологічної схеми, яка включає «неактивний міст» з пружним прокручуванням осі коліс та накопичуванням потенціальної енергії від додаткового пневматичного резистора.

Виклад основного матеріалу. Нами на основі викладеного матеріалу зроблена спроба роз-

робити робота для поверхневого розмінування в сірій зоні бойових дій.

На (рис. 8) представлений робот «Герц» для створення проходів в мінних полях в зоні бойових дій. Цей механізований робот складається з основних вузлів: пневматичного резистора, рухомого важеля, вільної осі, картера, бункерів важких дрібних часток, направляючих коліс, які розкидають.

На (рис. 9) представлений макет робота при розмінуванні.

На (рис. 10) представлена математична модель.

Навантажувальна кулька знаходиться у верхній і останній точці диску, що розкидає, яка виконана радіусом. Диск, що розкидає сповіщає швидкість v .

Навантажувальна кулька рухається разом з диском, що розкидає під дією двох сил: сили ваги G та реакції поверхні N , рис. 1. Основне рівняння динаміки для невідомої точки M :

$$m\omega = G + N \quad m\omega = G + N,$$

де ω – прискорення.

Рівняння руху кульки у формі Ейлера будуть мати вигляд:

$$m \frac{d^2 S}{dt^2} = G \sin \varphi \quad (1)$$

$$\frac{mV^2}{R} = G \cos \varphi - N \quad (2)$$

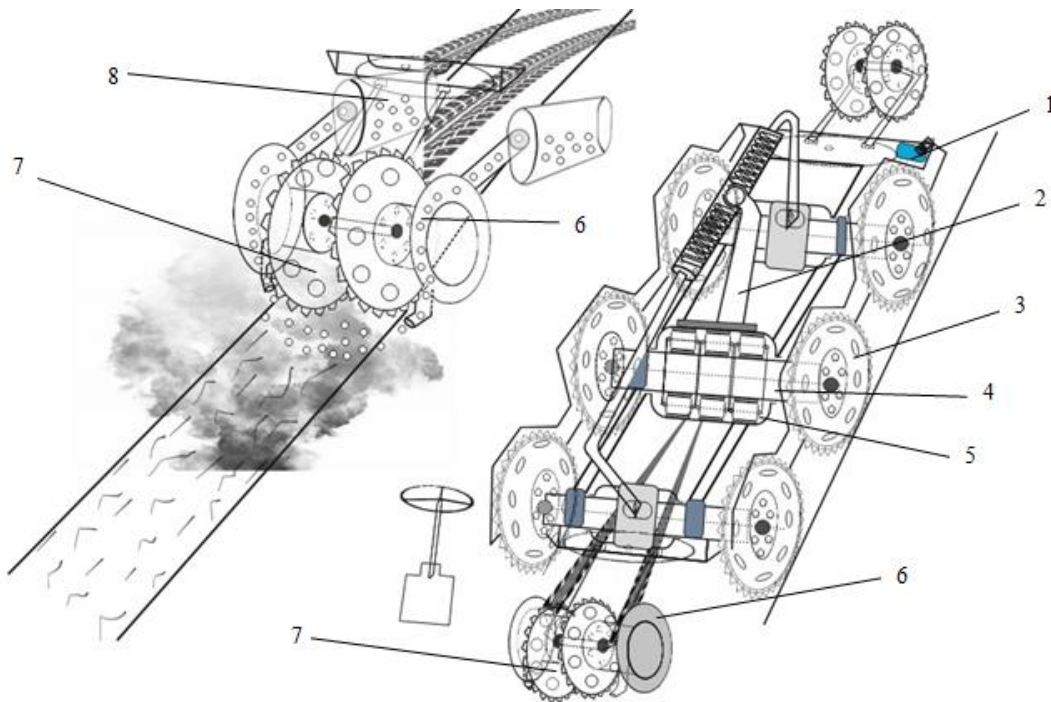


Рис. 8. Макет робота для розмінування

1 – пневматичний резистор, 2 – рухомий важіль, 3 – ходове колесо, 4 – вільна вісь, 5 – картер, 6 – направляюче колесо, що розкидає, 7 – диски, що формують потік важких дрібних часток, 8 – бункер важких дрібних часток.

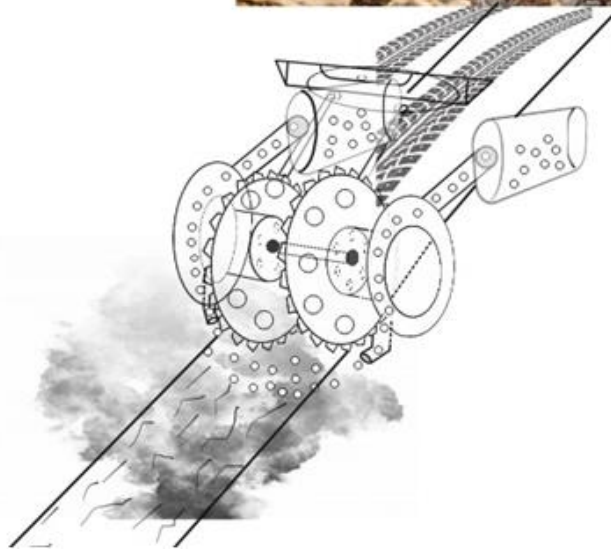


Рис. 9. Макет робота при виконанні технологічного процесу розмінування

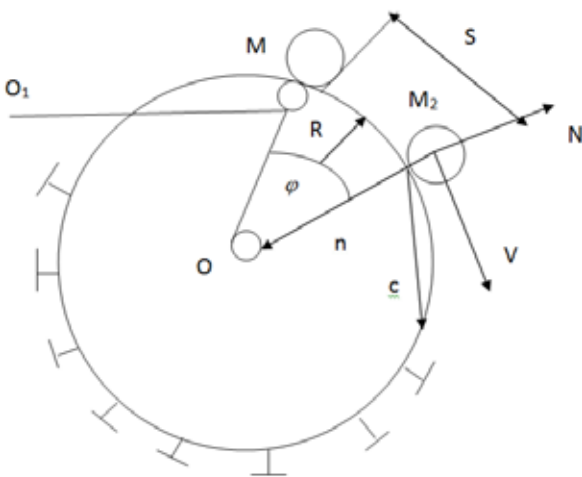


Рис. 10. Математична модель

У момент відділення кульки від поверхні реакція її дорівнюється нулю.

З рівняння (2) при $N=0$ отримуємо вирази:

$$\frac{d^2}{dt^2} = R \frac{d^2\varphi}{dt^2} = R \frac{d\omega}{dt} = R \frac{d\omega}{d\varphi} \cdot \frac{d\varphi}{dt} = R \frac{d\varphi}{d\varphi} \cdot \omega$$

$$\frac{mV^2}{R} = G \cos \varphi,$$

де G – навантажувальної кульки.

З цього рівняння отримуємо:

$$\cos \varphi = \frac{V^2}{gR} \quad (3)$$

З рівняння (1) робимо спробу знайти V ? За начало відліку t O_1 дугової координати S приймемо початкове положення кульки M_0 . Лінійна довжина координати S буде:

$$S=0, M = R \cdot \varphi \quad (4)$$

Інтегрування рівняння (4) приводить його до вигляду:

$$\frac{d^2 S}{dt^2} = R \frac{d^2 \varphi}{dt^2} = R \frac{d\omega}{dt} = R \frac{d\omega}{d\varphi} \cdot \frac{d\varphi}{dt} = R \frac{d\varphi}{d\varphi} \cdot \omega$$

Остаточно:

$$\frac{d^2 S}{dt^2} = R \cdot \frac{d\omega}{d\varphi} \cdot \omega \quad (5)$$

Отримане рівняння (5) підставляємо у рівняння (1) та маємо:

$$mR \frac{d\omega}{d\varphi} \cdot \omega = mg \cdot \sin \varphi \text{ чи } R\omega d\omega = g \cdot \sin \varphi d\varphi \quad (6)$$

Інтегрування цього рівняння (6) дозволяє отримати рівняння

$$R \frac{\omega^2}{2} = -g \cos \varphi + C \quad (7)$$

Кутову швидкість в рівнянні (7) виразимо через лінійну швидкість точки М та функції $\omega = \frac{S}{R}$:

$$\frac{V^2}{2R} = -g \cos \varphi + C \quad (8)$$

Значення С визначимо з рівняння (8) по початковим умовам

$$\varphi_0=0; V=V_0$$

$$\text{Тоді } C = \frac{V_0^2}{2R} + g$$

Підставимо значення С в рівняння (8) і отримуємо:

$$\frac{V^2}{2R} = -g \cos \varphi + \frac{V_0^2}{2R} + g \quad (9)$$

Обидві частини рівняння (9) помножимо на 2R

$$V^2 = V_0^2 + 2gR(1 - \cos \varphi) \quad (10)$$

Значення V^2 з рівняння (10) у рівняння (3) знаходимо

$$\cos \varphi = \frac{V^2}{gR} = \frac{V_0^2}{gR} + 2(1 - \cos \varphi), \quad (11)$$

З рівняння (11) отримуємо

$$\cos \varphi = \frac{1}{2} \left(2 + \frac{V_0^2}{gR} \right)$$

У точці, в якій відповідає кут $\varphi = \angle O_1OM_2$ навантажувальна кулька відокремлюється від направляючого колеса, що розкидає.

Висновки:

1. Запропоновано військового робота з пневматичним приводом коліс для створення проходів в мінних полях.

2. Вперше, запропонована конструкторсько-технологічна схема робота, яка включає «неактивний міст» з пружним прокручуванням осі коліс та накопичення потенційної енергії від додаткового пневматичного резистора.

3. Отримане рівняння, яке визначає точку на диску, що формує потік важких дрібних часток і цій точці відповідає кут при якому навантажувальна кулька відокремлюється від диска.

Список літератури:

1. Шишанов О.М., Коцюруба В.І, Гусяков О.М. «Комплексне моделювання процесу розмінування з використанням засобів інженерного озброєння» Озброєння та військова техніка № 4, 2014, с. 42–44.
2. Бойко В.В., Хлевнюк Т.В., Лавренов Л.В., Ган О.В., Приходько Ю.П. «Спосіб приготування водонаповненого спіненого вибухового композиту для ущільнення ґрунтів та розмінування місцевості», МПК E21C 37/00 F41H 11/00, UA № 140360, бюл. № 4, 2020, 1–3 с.

Petrov L.M., Kishianus I.V., Lysyi O.V., Verpivskiy S. M., Malinovskiy O.A., Nikishyn V.A., Sheluhin S.V. ROBOT "HERETS" FOR CREATING PASSAGES IN MINEFIELDS IN A COMBAT ZONE

The working process of a military robot for creating passages in minefields is accompanied by loading the wheels of the free axis with a movable lever that allows the running wheels kinematically connected to the wheels of the free axis to move in a given direction and at the same time guide the wheels to the disks that form a flow of heavy small particles. The article deals with the issues of theoretical research of the mechanical system of a military robot for creating passages in minefields with an elastic energy accumulator for creating a flow of heavy small particles and scrolling discs that form a flow of heavy small particles and a guide wheel that throws with the application of the Huygens-Steiner theorem, and as well as systems of the general equation of dynamics.

The purpose of the research is to create a military robot for creating passages in minefields with an elastic energy accumulator and a design and technological scheme that includes an "inactive bridge" with elastic scrolling of the wheel axis and accumulation of potential energy from an additional pneumatic resistor.

The scientific and practical significance of the work lies in the fact that for the first time the theory of a military robot for creating passages in minefields with an elastic energy accumulator to confirm its movement and the technology for its implementation was proposed, in which a portion of the energy from a pneumatic resistor is introduced during the rotation of the wheels of the free axis.

The research methodology was to establish a mathematical relationship between the movable lever and the rotation of the axis from the pneumatic resistor.

The result is a developed geometry of a military robot for creating passages in minefields with an elastic energy storage to confirm its movement of the work in a cycle of movement of a free axis with a spring storage corresponding to the movement of the running wheels between the first and third driven bridges.

The value of the conducted research, the results of the conducted work will make it possible to make a contribution to the field of robotic equipment for performing dangerous works where the presence of a person is optional.

A military robot is proposed for creating passages in minefields using elastic energy storage in the undercarriage.

Key words: *pneumatic resistor, running wheel, spreading guide wheel, disks, flow, free axis.*

УДК 656.038

DOI <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2024.2/46>**Шпак Н.Г.**

Одеський національний морський університет

Літачевський В.В.

Одеський національний морський університет

ДОСЛІДЖЕННЯ ВЗАЄМОДІЇ ТРАНСПОРТНО-ЕКСПЕДИТОРСЬКИХ ТА МИТНО-БРОКЕРСЬКИХ ПІДПРИЄМСТВ НА УМОВАХ АУТСОРСИНГУ

У статті досліджуються взаємовідносини між транспортно-експедиторськими та митно-брокерськими підприємствами при переміщенні вантажів на підставі зовнішньоекономічних угод. Від якості і повноти послуг, що надають такі підприємства залежить швидкість доставки товарів та проходження митних формальностей, а також фінансові витрати суб'єктів – імпортерів та експортерів. Забезпечення безперешкодного просування товарів між продавцями і покупцями, зниження витрат на транспортування та розмитнення товарів сприяють активізації міжнародної торгівлі та збільшенню вантажопотоків. На сучасному етапі представляє інтерес дослідження взаємодії транспортно-експедиторських та митно-брокерських підприємств на умовах аутсорсингу.

Під аутсорсингом (англ. *outsourcing*; укр. *підрядництво*) розуміють передачу компанією частини її завдань або процесів стороннім виконавцям на умовах субпідряду. Тобто це угода, за якою робота виконується працівниками з іншої компанії, що також є фахівцями у цьому виді робіт. Часто аутсорсинг використовують для скорочення витрат.

На сучасному етапі як експедирування так і митне обслуговування товарів відіграють важливу роль у підтримці міжнародної торгівлі та економічного обміну. Основні аспекти сучасного стану цих сфер включають:

- глобалізацію та зростання торгівлі, що призводить до збільшення обсягів експедирування та здійснення митне обслуговування;
- технологічні інновації, тобто використання сучасних технологій, таких як системи відстеження, електронні документи та інші інформаційні системи, що спрощує та прискорює процеси експедирування та митного оформлення;
- безпеку здійснення зовнішньоекономічних угод – увага до питань безпеки призводить до посилення контролю на кордонах та удосконаленню митного регулювання;
- глобальні виклики, такі як пандемія, призводять до необхідності адаптації експедиторів та митних посередників до нових умов та змін;
- екологічну усвідомленість, оскільки збільшення уваги до екологічних аспектів приводить до розгляду ефективних та екологічно чистих методів експедирування та митних операцій;
- міжнародні угоди та договори, укладення та виконання яких впливає на стандарти та правила, які регулюють експедирування та митні операції.

Всі ці аспекти об'єднуються, створюючи динамічне середовище як для експедиторів так і для митних брокерів і вимагають постійну адаптацію та удосконалення.

Ключові слова: транспортно-експедиторська діяльність, митно-брокерська діяльність, доставка товару, аутсорсинг.

Постановка проблеми. Функціонування транспортно-експедиторських та митно-брокерських підприємств, що здійснюють обслуговування зовнішньоекономічної діяльності в умовах нестабільності ринкового середовища вимагає дослідження і аналіз дії цілого комплексу взаємопов'язаних чинників для координації та реалізації зважених управлінських рішень.

В умовах інтеграції України до світових ринків, що є основою зближення національних економічних систем, особливої уваги набуває модернізація системи регулювання підприємницьких структур, серед яких важливе місце займають транспортно-експедиторські організації та митні посередники, що забезпечують безперешкодне переміщення вантажів.

Формування методів регулювання взаємовідносин між транспортно-експедиторськими та митно-брокерськими підприємствами може стати передумовою для підвищення якості та швидкості переміщення товарів між суб'єктами зовнішньоекономічної діяльності, що сприятиме залученню нових вантажопотоків і реалізації транспортного потенціалу України.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Теоретичні та практичні питання діяльності транспортних посередників при здійсненні зовнішньоекономічної діяльності присвячено чимало робіт зарубіжних та вітчизняних вчених [1-3]. В окремих роботах зроблено акцент на питання діяльності транспортно-експедиторських та митно-брокерських підприємств, що залучаються при переміщенні товарів [4-6]. З'являються нечисленні публікації фахових експертів щодо необхідності перебудови транспортних маршрутів в умовах воєнного стану [7], що підтверджує офіційна статистика відносно загальносвітових трендів [8].

При цьому, незважаючи на незаперечну практичну значущість проведених досліджень, проблеми організації та здійснення посередницької діяльності в транспортній сфері ще не достатньо досліджені та потребують вирішення.

Постановка завдання. Метою статті є розгляд основних особливостей та дослідження діяльності транспортно-експедиторських та митно-брокерських підприємств на умовах аутсорсингу.

Виклад основного матеріалу. Посередницькі послуги у сфері зовнішньоекономічної діяльності впливають на ефективність господарювання учасників міжнародної торгівлі. Головна мета залучення посередників полягає в підвищенні економічності зовнішньоторгових операцій шляхом залучення капіталу посередників при здійсненні транспортно-експедиторських, митно-брокер-

ських, страхових та сервісних операцій; покладання ризиків, пов'язаних з доставкою вантажів на посередників; підготовки товару до збуту, маркуванню; швидкого реагування посередників на зміни кон'юнктури ринку.

Повномасштабна війна, що прийшла в Україну вплинула обсяги на вантажообіг і як наслідок на попит послуг компаній, що здійснюють його обслуговування, а в першу чергу це саме транспортно-експедиторські та митно-брокерські підприємства.

Порівняно з довоєнним 2021 роком, у надзвичайно важких військових умовах 2022 року портовий вантажообіг обвалився у 2,6 рази. Саме тому, коли у 2023 році українські порти збільшили перевалку вантажів на 5% можна вважати початком відновлення галузі (рис. 1) [9].

Одним з чинників, що вплинули на поліпшення ситуації є відкриття тимчасового морського коридору. В рамках діючого коридору було відправлено – 400 суден, що експортували 12,8 млн т вантажів.

При цьому серед великих портів тільки в порту Одеса було помічено зростання на 9% до 8.4 млн.т, а в Чорноморську та Південному в порівнянні з минулим роком спостерігалось зниження (на 3% та на 34 % відповідно) (рис. 2) [9].

Значне збільшення перевалки можна побачити в дунайських портах («Ізмаїл», «Рені» та «Усть-Дунайськ»). Зокрема у 2023 році сукупний вантажообіг у цих портах зріс майже вдвічі, у 2022-му – втричі.

Використання послуг кваліфікованих експедиторських та митно-брокерських посередників сприяє підвищенню обсягів зовнішньоторгових операцій завдяки залученню капіталу посередників при здійсненні транспортних, страхових та сервісних операцій, покладання ризиків, пов'язаних з доставкою вантажів на посередни-



Рис. 1. Перевалка вантажів в українських портах у 2023 роках



Рис. 2. Портова перевалка за напрямками у 2023 році

ків, швидкого реагування посередників на зміни кон'юнктури ринку.

Загалом, ефективні процеси експедирування та митниці створюють сприятливе середовище для міжнародного бізнесу, сприяючи розвитку та співпраці між країнами.

Глобалізація та зростання торгівлі є невід'ємною частиною сучасної світової економіки. Це сприяє підвищенню ефективності використання ресурсів, розширенню ринків для підприємств, стимулюванню інновацій та наукового прогресу.

Країни залучають іноземні інвестиції, що сприяє їхньому економічному розвитку та забезпечує зростання числа робочих місць. Споживачі отримують доступ до різноманітних товарів та послуг, підвищуючи свої вибіркові можливості. Глобалізація також сприяє розвитку міжнародних відносин, створюючи партнерства та співпрацю між країнами.

Від якості і повноти транспортних послуг залежать термін проходження митних формальностей, фінансові витрати суб'єктів – імпортерів та експортерів.

Ефективність експедирування та митного обслуговування вантажів відіграють важливу роль у міжнародній торгівлі та економіці з наступних причин:

1. Сприяння потокам товарів – швидкі та ефективні процеси експедирування та митного обслуговування дозволяють товарам швидко перехо-

дити через кордони, що сприяє безперервним потокам товарів між країнами.

2. Зниження витрат та підвищення конкурентоспроможності – оптимізація експедиційних та митних процедур допомагає знижувати витрати для підприємств, збільшуючи їхню конкурентоспроможність на світовому ринку.

3. Більша надійність та точність – добре налаштовані системи експедирування та митного оформлення сприяють надійній та точній обробці товарів, що важливо для уникнення затримок та помилок.

4. Розвиток міжнародної торгівлі – зручні та ефективні методи розмитнення вантажів сприяють розвитку міжнародної торгівлі, що веде до збільшення обсягів обміну товарами між країнами.

5. Стимулювання економічного зростання – збільшення обсягів міжнародної торгівлі та ефективне експедирування підтримують економічне зростання, створюючи нові можливості для підприємств та сприяючи зростанню зайнятості.

6. Дотримання міжнародних стандартів – співробітництво у сфері експедирування та митно-брокерського обслуговування допомагає країнам дотримуватися міжнародних стандартів та правил, що сприяє забезпеченню чесної та рівноправної торгівлі.

Загалом, ефективні процеси експедирування та митниці створюють сприятливе середовище

для міжнародного бізнесу, сприяючи розвитку та співпраці між країнами.

Глобалізація та зростання торгівлі є невід'ємною частиною сучасної світової економіки. Це сприяє підвищенню ефективності використання ресурсів, розширенню ринків для підприємств, стимулюванню інновацій та наукового прогресу. Країни залучають іноземні інвестиції, що сприяє їхньому економічному розвитку та забезпечує зростання числа робочих місць.

Споживачі отримують доступ до різноманітних товарів та послуг, підвищуючи свої вибіркові можливості. Глобалізація також сприяє розвитку міжнародних відносин, створюючи партнерства та співпрацю між країнами.

Діяльність експедиторів та митних брокерів відіграє ключову роль у забезпеченні ефективного та безперервного переміщення товарів між суб'єктами, що здійснюють зовнішню торгівлю. Їх функції представлені на рис. 3 та включають:

1. Логістичне планування – визначають оптимальні маршрути та методи перевезення для максимізації ефективності та мінімізації витрат.

2. Митне оформлення – взаємодіють із митницями для забезпечення вірного та своєчасного митного оформлення товарів, дотримуючись всіх вимог та стандартів.

3. Оформлення товаросупровідної документації – відповідають за правильне складання та обробку необхідних документів, таких як транспортні документи, рахунки, дозволи та інші.

4. Трекінг та відстеження – використовують технології для трекінгу та відстеження вантажів, надаючи клієнтам актуальну інформацію щодо місцезнаходження та стану вантажу.

5. Вирішення проблем – взаємодіють із різними сторонами, вирішуючи можливі проблеми або затримки, що можуть виникнути під час транспортування.

6. Переговори та контрактні відносини – укладають контракти з різними постачальниками та перевізниками, визначаючи умови співпраці та забезпечуючи виконання домовлених умов.

7. Створення доданої вартості – надають додану вартість, оптимізуючи логістичні процеси та забезпечуючи оптимальну роботу ланцюга постачання.

Від кваліфікації надання якісних послуг, грамотності та професіоналізму експедиторів та митних брокерів залежить швидкість пересування товарів, повна і своєчасна сплата податків від транспортних послуг та митних платежів від їх діяльності до Державного бюджету України.

Можливі джерела надходження до Державного бюджету України від транспортно-експедиторських та митно-брокерської діяльності представлені на рис. 5.

До основних напрямків підвищення ефективності імпортно-експортної діяльності українських підприємств є:

1) визначити пріоритетні напрями та забезпечити відповідну державну підтримку розвитку галузей національної економіки та видів виробництва, які забезпечуватимуть потреби внутрішнього ринку в якісних конкурентоспроможних товарах, подібних до імпортованих Україною;

2) розвиток тих галузей, що є імпортозаміщеними і їх подальша експортна орієнтація за умови повного задоволення потреб внутрішнього ринку в цих товарах;



Рис. 3. Спільні функції експедирування та митно-брокерського обслуговування вантажів

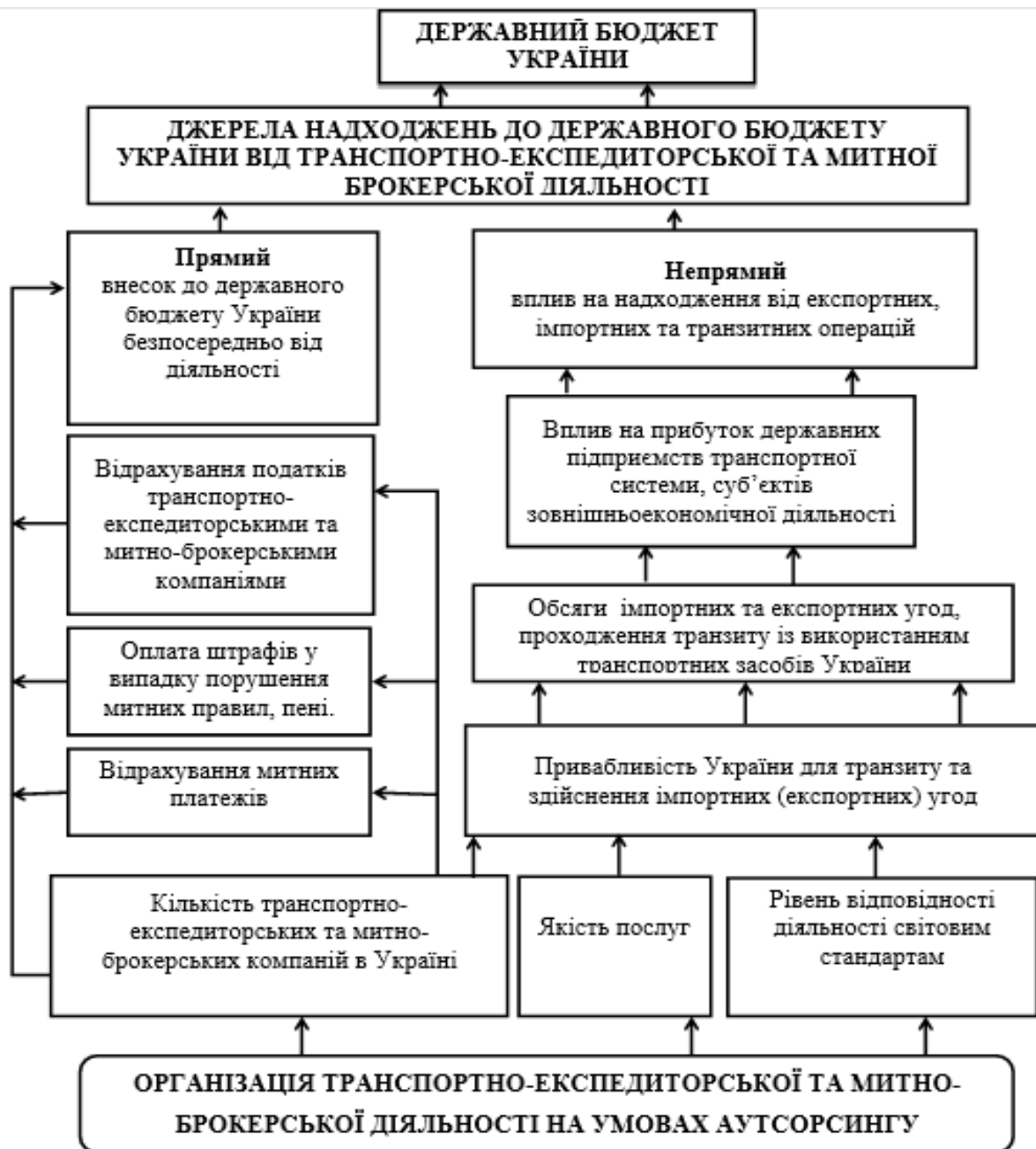


Рис. 5. Надходження до Державного бюджету України від транспортно-експедиторських та митно-брокерської діяльності

3) підвищення конкурентоспроможності вітчизняної продукції на внутрішньому та зовнішньому ринках шляхом впровадження новітніх технологій та використання сучасного обладнання;

4) залучення іноземних інвестицій для створення сильного експортного сектора;

5) сприяння діяльності, пов'язаній з економічною інтеграцією в європейські та світові економічні об'єднання та організації.

Висновки. Зосередження на пошуку найпростішого способу експедирування та митного оформлення товарів, що переміщуються через

митний кордон є одним із найважливіших пріоритетів і потребує підвищеної уваги. Певною мірою це може стати фактором розвитку вітчизняних виробників, оскільки підвищення рівня організації та якості митного контролю спрямоване на створення всіх необхідних умов для виходу вітчизняних виробників на зовнішні ринки.

Дослідження полягає в аналізі та визначенні стратегій поєднання експедиторських та митно-брокерських послуг у міжнародній логістиці. Дослідження спрямоване на виявлення основних проблем та викликів, які виникають при взаємо-

дії цих двох компонентів постачального ланцюгу, а також на розробку рекомендацій для їхнього оптимального поєднання.

Сучасні умови функціонування транспортного комплексу України потребують ретельного обґрунтування варіантів схем доставки зовніш-

ньоторговельних вантажів. Забезпечення безпешкодного просування товарів між продавцями і покупцями, зниження витрат на транспортування та розмитнення товарів сприяють активізації міжнародної торгівлі та збільшенню вантажо-потоків.

Список літератури:

1. Офіційний сайт Міністерства розвитку громад, територій та інфраструктури України. URL: <https://mtu.gov.ua/> (дата звернення: 13.03.2024)
2. Шпак Н.Г. Дослідження впливу інтеграції на показники учасників міжнародної економічної системи. *Розвиток методів управління та господарювання на транспорті*. 2018. № 4 (65). С. 134–149. doi: 10.31375/2226-1915-2018-4-134-149
3. Cavallia F., Naimzada A. K., Pecora N. Complex interplay between monetary and fiscal policies in a real economy model. *Chaos, Solitons & Fractals*. 2019. Vol. 128. P. 318–330.
4. Alloza M., Burriel P. Pérez J.J. Fiscal policies in the euro area: Revisiting the size of spillovers. *Journal of Macroeconomics*. 2019. Vol. 61. P. 103–132.
5. Шпак Н.Г. Визначення конкурентоспроможності учасників міжнародної економічної системи з урахуванням митного чинника. *Бізнес-інформ*. 2018. № 12 (491). С. 149–155.
6. Глушенко М.І., Кічка О.І. Моделювання процесів транспортного обслуговування логістичних систем. Зб. наукових праць науково-практичної конференції «Логістичне управління та безпека руху на транспорті», тези доп. Сєвєродонецьк, 2015. С. 17–19.
7. Коробкова О.М. Логістична діяльність підприємств в умовах воєнного стану. *Actual problems of modern science*. 2023. № 4. С. 457–459.
8. Державна служба статистики України. URL: <https://www.ukrstat.gov.ua/> (дата звернення: 24.03.2024)
9. Юрій Григоренко У 2023 році перевалка вантажів в українських портах зросла на 5% URL: <https://gmk.center.ua/infographic/u-2023-rotsi-perevalka-vantazhiv-v-ukrainskykh-portakh-zroslo-na-5-r-r/> (дата звернення: 14.03.2024)

Shpak N.G., Litachevskiy V.V. STUDY OF THE INTERACTION OF TRANSPORT FORWARDING AND CUSTOMS BROKERAGE ENTERPRISES ON THE TERMS OF OUTSOURCING

The article examines the relationship between transport-forwarding and customs-brokerage enterprises during the movement of goods on the basis of foreign economic agreements. The speed of delivery of goods and the passage of customs formalities, as well as the financial costs of subjects – importers and exporters, depend on the quality and completeness of the services provided by such enterprises. Ensuring the unhindered promotion of goods between sellers and buyers, reducing the costs of transportation and customs clearance of goods contribute to the activation of international trade and the increase of cargo flows. At the current stage, it is interesting to study the interaction of transport-forwarding and customs-brokerage enterprises under the conditions of outsourcing.

Outsourcing (English outsourcing; Ukrainian contracting) is understood as the transfer by a company of part of its tasks or processes to third-party executors on the terms of subcontracting. That is, it is an agreement under which the work is performed by employees from another company who are also specialists in this type of work. Outsourcing is often used to reduce costs.

At the current stage, both forwarding and customs service of goods play an important role in supporting international trade and economic exchange. The main aspects of the current state of these areas include:

- *globalization and the growth of trade, which leads to an increase in the volume of forwarding and the implementation of customs services;*
- *technological innovations, that is, the use of modern technologies, such as tracking systems, electronic documents and other information systems, which simplifies and accelerates the processes of forwarding and customs clearance;*
- *security of foreign economic agreements – attention to security issues leads to strengthening of border control and improvement of customs regulation;*
- *global challenges, such as the pandemic, lead to the need for freight forwarders and customs brokers to adapt to new conditions and changes;*
- *environmental awareness, as increased attention to environmental aspects leads to consideration of efficient and environmentally friendly methods of forwarding and customs operations;*

– international agreements and contracts, the conclusion and implementation of which affects the standards and rules that regulate shipping and customs operations.

All these aspects combine to create a dynamic environment for both freight forwarders and customs brokers and require constant adaptation and improvement.

Key words: *transport and forwarding activity, customs brokerage activity, delivery of goods, outsourcing.*

Шумило О.М.

Одеський національний морський університет

ТЕХНІЧНІ ТА ЕКОНОМІЧНІ АСПЕКТИ УПРАВЛІННЯ ЖИТТЄВИМ ЦИКЛОМ МОРСЬКОГО СУДНА

Управління життєвим циклом судна є необхідною складовою в системі рішень з управління флотом та його роботою. Визначення сутності, етапів, складу та динаміки основних показників – технічних та економічних – життєвого циклу судна, є основою для подальшої розробки моделей та методів обґрунтування виду та варіанта модернізації. Експлуатація судна у межах визначеного терміну пов'язана з двома основними аспектами – технічними та комерційними. Баланс усіх витрат і вигод повинен лежати в основі прийняття рішень щодо управління життєвим циклом з комерційної точки зору, а також безпеки (мінімізації ризиків) з технічного погляду.

Охарактеризовано основні існуючі погляди на етапи життєвого циклу судна та встановлено, що фактично для багатьох судновласників управління життєвим циклом зводиться до управління експлуатаційною фазою. Сформовано узагальнену схему життєвого циклу судна як поєднання життєвих циклів даного судна для ланцюга судновласників. Охарактеризовано сутність категорії «life hope» у застосуванні для судноплавства, а саме, відповідність даної категорії експлуатаційному етапу життєвого циклу судна. Проаналізовані існуючі концепції оцінки життєвого циклу виробничих об'єктів у застосуванні до суден – LCC (Life cycle cost), LCA (Life cycle assessment). Сформовано систему факторів, які впливають на фактичний термін експлуатації суден та можливості його продовження. Пропоновано інтегральну систему показників, які відображають результати технічної та комерційної експлуатації суден. Встановлено загальну динаміку даних показників протягом життєвого циклу судна. Дана система показників охоплює, у тому числі технічні та комерційні ризики, а також у відповідності до сучасних трендів, накопичену «шкоду» навколишньому середовищу в рамках застосування LCA (Life cycle assessment). Пропоновані результати складають базу для моніторингу життєвого циклу та подальшого дослідження питань з управління життєвим циклом судна ґрунтуючись на врахуванні як технічних, так й економічних його аспектів.

Ключові слова: управління життєвим циклом судна, комерційна та технічна експлуатація, ризики, ефективність, безпека судноплавства.

Постановка проблеми. З урахуванням значної вартості морських суден їх будівництво вимагає такого розміру інвестицій, які не всі, навіть успішні судноплавні компанії та компанії-судновласники можуть собі дозволити. Крім того, сучасні глобальні тенденції пов'язані з «розумним» ставленням до існуючих технічних об'єктів (якими є морські судна), що, з одного боку, вимагає продовження терміну їх експлуатації, з іншого боку, забезпечення їх відповідності всім сучасним вимогам. Для судноплавства, зокрема, такими вимогами є безпека [1-3] та екологічність [4-6]. Тому продовження життєвого циклу суден при забезпеченні ефективності їх роботи з урахуванням вимог безпеки та екологічності є однією з важливих проблем для управління флотом. Її рішення потребує інтегрального підходу на основі обліку економічних та технічних аспектів.

Основним засобом продовження життєвого циклу судна є модернізація, яка може відноситися або лише до окремих систем суден [7],

або являти собою масштабну конверсію судна [8,9]. Дані рішення приймаються з урахуванням вимог сучасної системи судноплавства, а також економічних інтересів компаній-судновласників. Для визначення необхідності модернізації суден, її варіанта та термінів проведення необхідний моніторинг основних технічних та економічних показників суден протягом усього їх життєвого циклу. Тому визначення сутності, етапів, складу та динаміки основних показників – технічних та економічних – життєвого циклу судна, є основою для подальшої розробки моделей та методів обґрунтування виду та варіанта модернізації.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Слід зазначити, що у сучасних публікаціях структура (етапи) життєвого циклу суден представлено у декількох варіантах, які не суперечать одне одному, а відбивають переважно окремі аспекти чи етапи життєвого циклу. Найбільш часто згадуваним джерелом під час розгляду життєвого

циклу судна є [10], де, зокрема, для контейнерних суден представлені не тільки етапи, а й країни, що найбільш часто забезпечують кожен етап життєвого циклу судна. Концепція життєвого циклу судна на рис. 1 [11] відбиває ідею переробки старих суден (recycling) як старту нового судна – «кругообіг» суден.

Технічне обслуговування суден є важливою складовою їх життєвого циклу, що відображено на схемі на рис. 2, який представлений у [9]. При цьому конверсія сприймається як процес, що впливає етап експлуатації судна. На цій же схемі є етап «Life extension» – розширення життя судна – при цьому автори [9] не конкретизують сутність даного етапу. Очевидно, мається на увазі, що запланований етап «експлуатація та обслуговування» збільшується за рахунок саме конверсії, модифікацій та обслуговування.

Аналогічно в [12] автори підкреслюють «переобладнання» і «ремонт» як важливі складові технічного обслуговування суден на експлуатаційній фазі.

Таким чином, можна стверджувати, що сутність основних етапів життєвого циклу судна, в принципі, досить добре охарактеризована у сучасній літературі. Проте, щодо основних технічних та економічних показників життєвого циклу

судна – тут слід зазначити практичну відсутність інтегрального підходу до розгляду відповідних «індикаторів». Як правило, автори розглядають лише один аспект життєвого циклу, пропонуючи рішення щодо оптимізації. Так, наприклад, у [13] увага зосереджена на вартості життєвого циклу. Також слід зазначити, що сучасні концепції LCA (Life cycle assessment) [14] та LCM (Life cycle management) [15] орієнтовані на те, що судно з моменту початку його будівництва і до його утилізації розглядається з точки зору однієї особи, яка приймає рішення, що не відповідає практиці судноплавного бізнесу (можлива зміна кількох власників судна протягом його життєвого циклу) і потребують певної інтерпретації.

Постановка завдання. З урахуванням вищезазначеного, метою даного дослідження є визначення складу та динаміки системи технічних та економічних показників для моніторингу життєвого циклу судна в процесах управління. Досягнення мети пов'язано з вирішенням наступних завдань: 1) характеристика сучасних концепцій до управління життєвим циклом морського судна; 2) визначення принципового вигляду динаміки основних технічних та економічних характеристик експлуатації морського судна протягом його життєвого циклу.

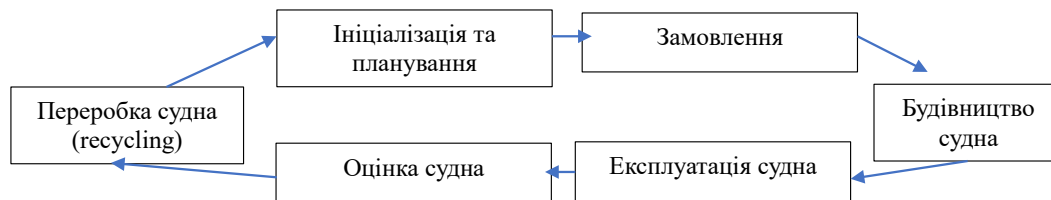


Рис. 1. Життєвий цикл судна

Джерело: [11]

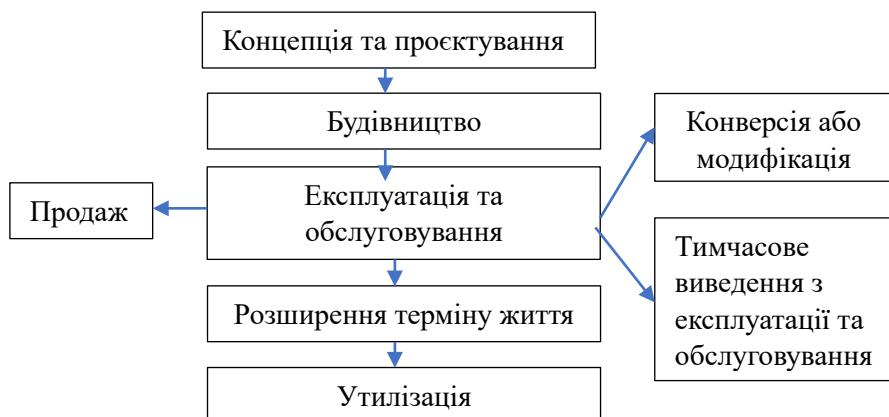


Рис. 2. Життєвий цикл, що передбачає модифікацію та конверсію суден

Джерело: [9]

Виклад основного матеріалу

Сучасні підходи до управління життєвим циклом морського судна

Поряд із терміном «життєвий цикл» для судна в [14] використовується також термін «life hore», зміст якого – це, по суті, очікуваний термін експлуатації (дослівний переклад цього поняття не є доцільним). І досить часто, коли йдеться про продовження життєвого циклу судна, саме період експлуатації мають на увазі. Також, коли оцінюють життєвий цикл суден (він різних типів суден у діапазоні 25 до 40 років [14], але у більшості – 25–30 років), також мають на увазі саме експлуатаційний період (operation).

Очевидно, що слово «hore» (надія) у терміні «life hore» використовується з тієї причини, що тривалість терміну служби судна може лише передбачатися, оскільки фактичне значення визначається дуже багатьма факторами. Цей термін був запозичений з маркетингу, де «life hore» використовувався з метою оцінки життєвого циклу нових продуктів, оцінити термін життя яких ринку при їх запуску на ринок дуже складно, а оцінити ефективність – необхідно.

Зазначимо, що «звуження» життєвого циклу судна до експлуатаційного етапу («operation») та використання цих термінів як синонімів – «життєвий цикл» та «термін експлуатації (експлуатаційний етап)», коли йдеться про різні заходи, у тому числі які пов'язані з ремонтом і обслуговуванням суден, обумовлюється ще й з тим, що значна кількість судновласників стають власне судновласниками вже в процесі експлуатаційного

періоду життєвого циклу судна, і лише частина судновласників контролюють усі етапи життєвого циклу судна.

Тому те, що у [9, 11, 12] (охарактеризовано вище) сприймається як «життєвий цикл судна з позиції судновласника», є переважно концепцією, якщо розуміти «судновласника» як узагальнене поняття – судновласники у принципі. Таким чином, фактично життєвий цикл судна з позиції конкретного судновласника може бути представлений схематично наступним чином (рис. 3). А весь «шлях» судна від проектування до утилізації – це життєвий цикл судна в принципі.

Таким чином, приймаємо, що саме експлуатаційна фаза життєвого циклу судна з позиції конкретного судновласника має на увазі при розгляді питань, пов'язаних із модернізацією, технічним обслуговуванням та іншими заходами з управлінням життєвим циклом – терміном служби – судна.

Як вище було зазначено, у сучасній літературі, в тому числі і пов'язаної з морським транспортом і судноплавством, використовується термін «Life cycle management» – управління життєвим циклом [15] – діяльність з управління життєвим циклом (LCM), яка пов'язана з проектуванням, будівництвом, експлуатацією та обслуговуванням суден. Таким чином, це передбачає, у тому числі, прийняття рішень щодо частоти та обсягів перевірок, технічного обслуговування, ремонтів суден. З урахуванням вищесказаного, управління життєвим циклом у зазначеному контексті відбувається на експлуатаційному етапі життєвого циклу судна,

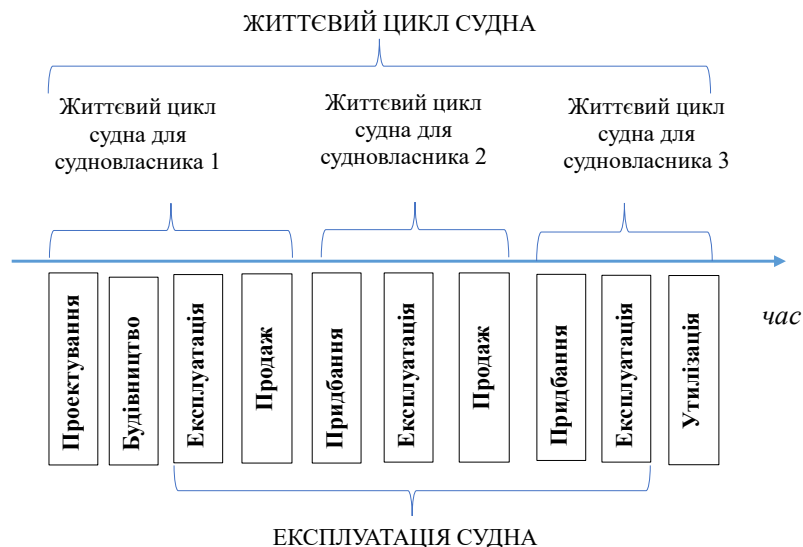


Рис. 3. Фактичний життєвий цикл судна з позиції судновласника

оскільки фактично управлінням на етапі проектування та будівництва судна займається дуже незначна частина судовласників. Таким чином, під управлінням життєвим циклом судна розумітимемо процес прийняття та реалізації рішень, пов'язаних з технічною та комерційною експлуатацією.

Отже, експлуатація судна у межах визначеного терміну пов'язана з двома основними аспектами – технічними та комерційними. Баланс усіх витрат і вигод повинен лежати в основі прийняття рішень щодо управління життєвим циклом з комерційної точки зору, а також безпеки (мінімізації ризиків) з технічного погляду. Технічна експлуатація передбачає прийняття та реалізацію рішень з технічного обслуговування, ремонтів та модернізації для забезпечення певних умов для комерційної експлуатації.

У рамках технічної експлуатації разом із вирішенням завдань технічного обслуговування судна та забезпечення його безпечної та безвідмовної роботи, розглядаються й завдання, пов'язані із впливом конкретного судна на довкілля – це сучасні вимоги судноплавства.

Поширена за останні роки, у тому числі, в судноплавстві, методологія LCA – Life cycle assessment – «оцінка життєвого циклу» в контексті впливу будь-якого промислового об'єкта на навколишнє середовище – у застосуванні до судноплавства, судна на навколишнє середовище передбачає врахування всього негативного впливу судна на довкілля накопиченим результатом. Так, в [14] наводиться схема, яка демонструє для судна ідею поведінки накопиченого результату викидів та витраченої енергії. Цей підхід є відображенням сучасного погляду на будь-які комерційні об'єкти, починаючи з їхнього «народження» – будівництва, до утилізації чи переробки у контексті важливості екологічних проблем сучасного суспільства.

З іншого боку, з погляду комерції, коли оцінюється комерційний об'єкт (а судно є комерційним об'єктом – джерелом отримання прибутку для власників та операторів) за весь життєвий цикл, то використовують методологію LCC – Life cycle cost [16], яка передбачає врахування всіх витрат, пов'язаних із судном, включаючи і операційні витрати, і витрати на ремонти, і менеджмент і т.д., причому витрати розглядаються кумулятивно – тобто накопиченим результатом. Відповідно до джерел [14,16] вартість життєвого циклу (LCC) = капітальні витрати + експлуатаційні витрати за весь термін служби + витрати на технічне обслуговування протягом усього терміну служби + витрати на утилізацію – залишкова вар-

тість. Як правило, оцінку LCC використовують у порівнянні кількох об'єктів [16]. Вважаємо, що в судноплавстві LCC може також використовуватися для співвіднесення з LCA, наприклад, для прийняття рішень щодо подальшої експлуатації судна, що, безумовно, має бути доповнено економічним аналізом «вигід», що отримується від експлуатації судна.

Такою економічною оцінкою «вигід» життєвого циклу судна можна вважати чисту наведену вартість (NPV – net present value) – показник ефективності інвестицій, який враховує всі витрати та доходи, пов'язані з судном з урахуванням зміни вартості грошей у часі – тобто дисконтування. Тут слід зазначити, деякі варіанти модернізації вимагають значних інвестицій й у деяких випадках банківського кредитування, що має бути відповідним чином враховано. Крім того, найважливішим аспектом будь-якого виду діяльності є ризики, які для судноплавства можуть бути ідентифіковані як технічні [17] та комерційні [18], причому ці ризики взаємопов'язані. Технічні ризики пов'язані з проблемами судна як технічної системи, наслідками яких є порушення безпеки у всіх її аспектах для судноплавства. Комерційні ризики пов'язані з недоотриманням (втратами) прибутку за рахунок збільшення витрат [19] (у тому числі під впливом прояву технічних ризиків) або зменшення доходів (у тому числі за рахунок перебування судна на ремонті та втрат «корисних» днів експлуатації судна).

На відміну від LCC, LCA технічні ризики не доцільно оцінювати як накопичувальну величину – саме їх абсолютне значення в конкретний момент часу є сигналом для оцінки необхідних рішень з управління життєвим циклом судна. Комерційні ризики можна оцінювати кумулятивно, але не весь життєвий цикл, а за певний період часу – наприклад, за рік, у тому числі, з урахуванням технічних ризиків та термінів виведення судна з експлуатації, але в конкретний момент часу. Наприклад, оцінка можливих комерційних ризиків протягом року становить певну величину, але у конкретний час.

Динаміка основних технічних та економічних характеристик експлуатації морського судна протягом його життєвого циклу

Отже, тільки інтегральний розгляд технічних та комерційних аспектів експлуатації судна має бути основою для прийняття рішень щодо його обслуговування, ремонтів, модернізації – або як альтернативи продажу судна, або його утилізації – тобто управлінням його життєвим циклом. Осно-

вні чинники, визначальні управління життєвим циклом судна під час експлуатації, представлені на рис. 4.

Зазначимо, що стан судна визначає практично всі техніко-експлуатаційні та економічні показники: його вартість, а також вартість обслуговування, ремонтів та модернізації. Крім того, стан судна впливає на експлуатаційні витрати – страхові платежі, витрати на паливо (з урахуванням, як правило, збільшення споживання палива під час старіння судна), вартості ремонтів, модернізації, технічного обслуговування.

При цьому стан судна визначає технічні ризики (відмова систем, поломки головного двигуна тощо), які, своєю чергою, впливають на комерційні ризики. Старе судно в гіршому стані при тайм-чартерній оренді отримує менший фрахт (залежність ставок тайм-чартера від віку, зокрема,

досліджувалося в [19]), за низького попиту на фрахтовому ринку старим судам доводиться пропонувати нижчі фрахтові ставки при рейсовому чартері [20]. Зрештою, судно у неналежному технічному стані потребує більш тривалого обслуговування, а це виведення судна з експлуатації та недоотримання прибутку.

Слід зазначити, що на всі вказані фактори, з іншого боку, впливає і ринок – фрахтовий, ринок суднового палива, ринок продажу суден, ринок судноремонту і технічного обслуговування суден. Так, історія судноплавства знає приклади, коли вартість суден віком 25–30 перевершувала вартості цих суден, коли їм було 5–10 років, що було пов'язано з фрахтовими ставками, що стрімко зростають, в умовах дефіциту пропозиції [21]. І, навпаки, після фінансової кризи 2008 року були приклади продажу суден на злам віком 10 років

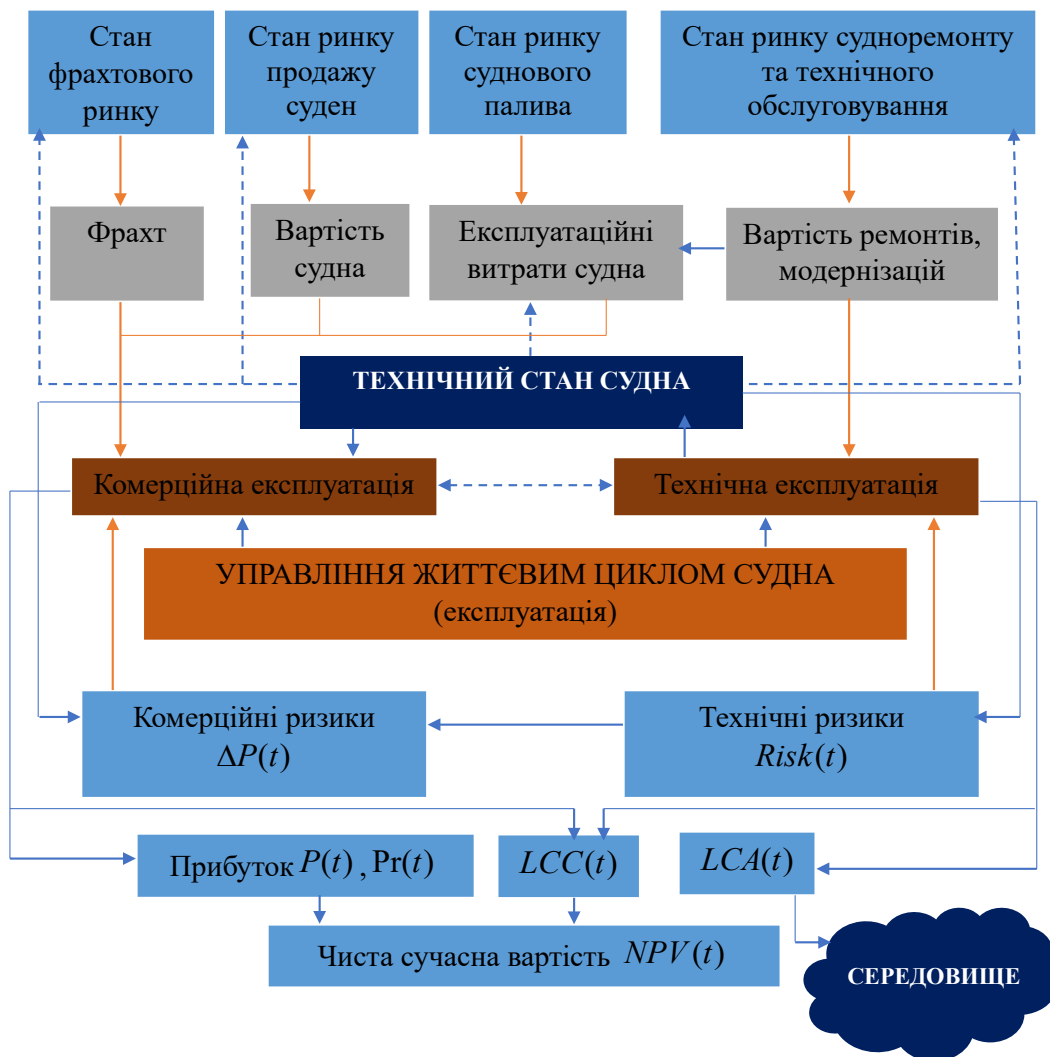


Рис. 4. Основні фактори, які впливають на управління життєвим циклом судна та його результати

з метою відшкодування частини витрат судновласників кредиторам. Проте, узагальненою тенденцією при старінні судна під час його експлуатації вважатимуться таку (рис. 5):

- Експлуатаційні витрати по судну $R^{op}(t)$ зазвичай поступово зростають (або можуть залишатися протягом якогось періоду часу на одному рівні) і можуть знижуватися тільки в періоди після капітальних ремонтів за рахунок поліпшення технічного стану судна;

- $LCC(t)$ – накопичені витрати, природно, зростають, але швидкість їхнього зростання залежить від витрат на технічне обслуговування, ремонти та модернізацію, в момент часу $t = 0$ $LCC(0) > 0$, з урахуванням витрат на придбання судна;

- $LCA(t)$ – зростає з урахуванням прийнятих тенденцій, як і $LCC(t)$, швидкість зростання залежить від проведених робіт по судну, в момент часу $t = 0$ $LCA(t) > 0$, так як у період будівництва, витрати енергії вже мали місце (якщо прийняти $LCA(t)$ як витрати енергії, як і відповідні шкідливі викиди в атмосферу);

- Прибуток накопичений $Pr(t)$ починається з 0 на момент часу $t=0$, і поступово зростає, природною вимогою до динаміки $Pr(t) \in Pr(t) > LCC(t)$ починаючи з певного, який може трактуватися як термін окупності. Зазначимо, що прибуток не передбачає облік інвестиційних витрат, а розглядається саме як прибуток від експлуатації суден;

- Технічні ризики $Risk(t)$ – як оцінка може виступати ймовірність технічних проблем з судном (буде розглянуто нижче) – цей показник може мати загальну тенденцію зростання або відсутність тенденції, але при цьому розвиватися за

синусоїдом з урахуванням того, що судно старіше – ризик зростає, Проте періодичні заходи, створені задля зміна технічного стану судна, знижують цей ризик;

- Комерційний ризик $\Delta P(t)$ – це можлива втрата прибутку за річний відрізок часу з урахуванням технічного ризику та ринкових тенденцій, оскільки цей показник більшою мірою залежить від ринкової кон'юнктури, то можна сказати, що за умовної відсутності значних ринкових коливань, цей показник веде себе аналогічно;

- Чиста приведена вартість $NPV(t)$ починається в момент часу $t=0$ з урахуванням інвестиційних витрат (будівництво або придбання) $NPV(0) < 0$ і поступово зростає за аналогією з $Pr(t)$, але з урахуванням дисконтування зростання повільніше, ніж зростання $Pr(t)$. Таким чином, технічний стан судна у певних ринкових умовах визначає економічну ефективність експлуатації судна, індикатором якого є $P(t)$ фактичний прибуток, а показником ефективності життєвого циклу судна є $NPV(t)$. Зауважимо, що вид кривих на рис. 5 носить узагальнений характер і відбиває принципову динаміку аналізованих показників. Так, представлена у всіх джерелах крива $LCC(t)$ фактично не має таку гладку форму, як уявляється, якщо протягом життєвого циклу судна здійснюються значні капіталовкладення в капітальні ремонти або ще значніші в модернізацію. І тут важливий вид кривої $LCC(t)$ як на рис. 6. Відповідно змінюється і форма кривої $NPV(t)$. Але дані зауваження лише підкреслюють розбіжність фактичних кривих аналізованих показників від «ідеалізованих» теоретичних.

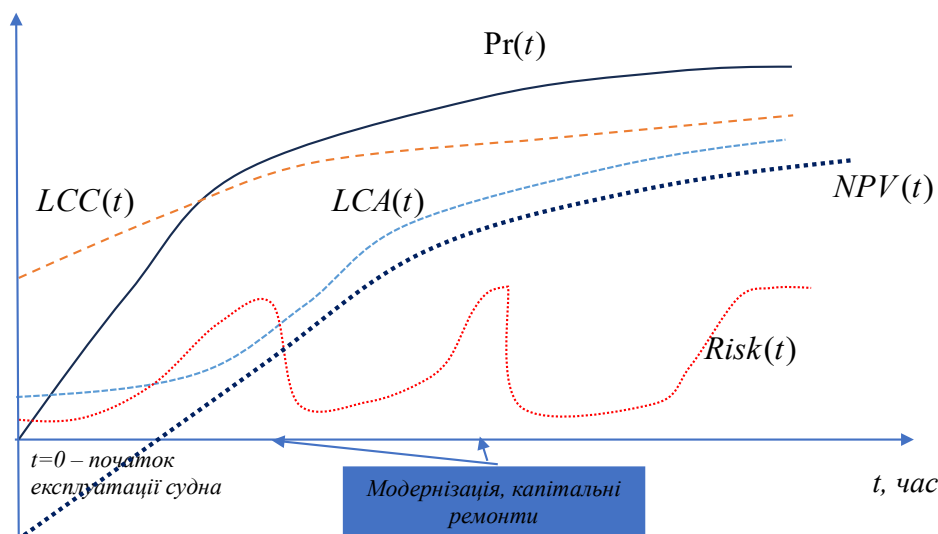


Рис. 5. Динаміка основних показників життєвого циклу судна

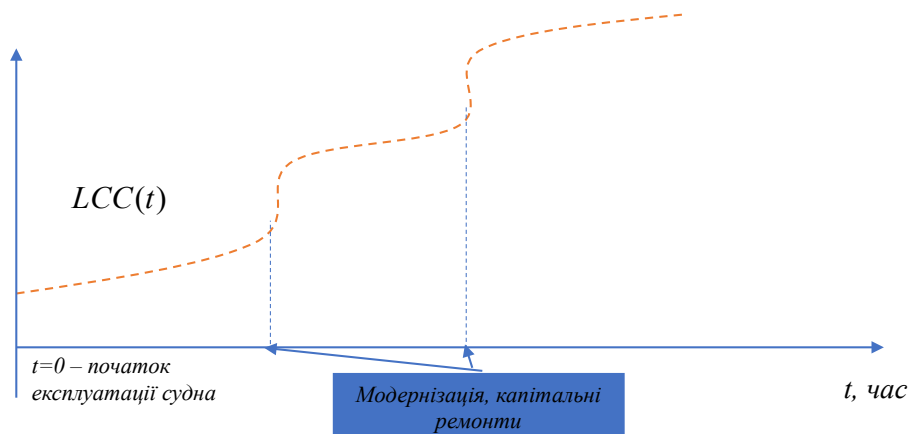


Рис. 6. Вид кривої LCC з урахуванням витрат на капітальні ремонти та модернізацію

Таким чином, представлена та охарактеризована система основних технічних та економічних показників життєвого циклу судна є інтегральною основою для моніторингу життєвого циклу та розробки рішень, пов'язаних із доцільністю та необхідністю його продовження.

Висновки. Управління життєвим циклом судна є необхідною складовою в системі рішень з управління флотом та його роботою. Охарактеризовано основні існуючі погляди на етапи життєвого циклу судна та встановлено, що фактично для багатьох судновласників управління життєвим циклом зводиться до управління експлуатаційною фазою. Сформовано узагальнену схему життєвого циклу судна як поєднання життєвих циклів даного судна для ланцюга судновласників. Охарактеризовано сутність категорії «life hope» у застосуванні для судноплавства, а саме, відповідність даної категорії експлуатаційному етапу життєвого циклу судна.

Проаналізовані існуючі концепції оцінки життєвого циклу виробничих об'єктів у застосуванні до суден – LCC (Life cycle cost), LCA (Life cycle assessment). Сформовано систему факторів, які впливають на фактичний термін експлуатації суден та можливості його продовження. Пропоновано інтегральну систему показників, які відображають результати технічної та комерційної експлуатації суден. Встановлено загальну динаміку даних показників протягом життєвого циклу судна. Дана система показників охоплює, у тому числі технічні та комерційні ризики, а також у відповідності до сучасних трендів, накопичену «шкоду» навколишньому середовищу в рамках застосування LCA (Life cycle assessment). Пропоновані результати складають базу для моніторингу життєвого циклу та подальшого дослідження питань з управління життєвим циклом судна ґрунтуючись на врахуванні як технічних, так й економічних його аспектів.

Список літератури:

1. Melnyk O., Bychkovsky Y., Shumylo O., Onyshchenko S., Onishchenko O., Voloshyn A., Cheredarchuk N. Study of the risk assessment quality dependence on the ships accidents analysis. Scientific Bulletin" Mircea cel Batran" Naval Academy, 2022. 25(1), P. 136-146. DOI:10.21279/1454-864X-22-I1-015
2. Melnyk O., Onyshchenko S., Koryakin K. Nature and origin of major security concerns and potential threats to the shipping industry. Scientific Journal of Silesian University of Technology. Series Transport. 2021. 113. P.145–153 DOI: 10.20858/sjsutst.2021.113.11
3. Melnyk O., Onyshchenko S. Ensuring safety of navigation in the aspect of reducing environmental impact. In International Symposium on Engineering and Manufacturing 2021. P. 95-103. Cham: Springer International Publishing. DOI: 10.1007/978-3-03103877-8_9
4. Melnyk O., Onyshchenko S., Onishchenko O., Shumylo O., Voloshyn A., Ocheretna V. & Fedorenko O. Implementation Research of Alternative Fuels and Technologies in Maritime Transport. Modern Technologies in Energy and Transport. Studies in Systems, Decision and Control. 2024. vol 510, P.13-21. DOI: 10.1007/978-3-031-44351-0_2
5. Melnyk O., Onishchenko O., Onyshchenko S. Renewable Energy Concept Development and Application in Shipping Industry. Lex Portus, 2023. 9. P.15-24. DOI:10.26886/2524-101X.9.6.2023.2
6. Onishchenko O., Golikov V., Melnyk O., Onyshchenko S., Obertiur K. Technical and operational measures to reduce greenhouse gas emissions and improve the environmental and energy efficiency of ships. Scientific

Journal of Silesian University of Technology. Series Transport. 2022. Vol.116. P. 223-235. DOI: 10.20858/sjsutst.2022.116.14.

7. Shumylo O. Optimization of passenger vessels dimensional modernization taking into account the energy efficiency. *Transport Development*. 2023. № 4(15). P. 58-77. DOI: 10.33082/td.2022.4-15.0

8. Шумило О.М., О.І. Россомаха, А.В. Шахов. Удосконалення моделі визначення вартості життєвого циклу судна. *Розвиток транспорту*. 2021. No 1(8). С. 113 – 124.

9. Brown Alan, Tikka Kirsi, Daidola John, Lützen Marie. *Structural Design and Response in Collision and Grounding*. SNAME Trans. 2000. 108 p.

10. Rodrigue Jean-Paul, Comtois Claude, Slack, Brian. *The Geography of Transport Systems*. 2016. DOI: 10.4324/9781315618159.

11. Patwary Muhammed J. A., Rahman, Mohammad Osiur, Hossain, Mohammad. *Uncertainty Handling in Ship Assessment: A Case Study of Bangladesh*. 2015. 4. P.152-161.

12. Ang J. H., Goh C., Choo C. T., Juveno, Lee Z. M., Jirafe V. P., Li Y. *Evolutionary Computation Automated Design of Ship Hull Forms for the Industry 4.0 Era*. In: 2019 IEEE Congress on Evolutionary Computation (CEC), Wellington, New Zealand, 10-13 Jun 2019, P. 2347-2354. ISBN 9781728121536.

13. Пізінцалі Л.В., Александровська Н.І. Оптимізація параметрів моделі вартості життєвого циклу судна програмним комплексом IOSO NM. *Perspective trajectory of scientific research in technical sciences: Kollektive monograph*. Riga, Latvia, Baltija Publishing. 2021. P.383 – 399.

14. Popa Catalin, Florin Nicolae, Haralambie Beizadea. *Application of Life Cycle Assessment (LCA) in Shipping Industry*. 2014. SGEM2014 Conference Proceedings. 2. DOI:10.5593/SGEM2014/B42/S19.038.

15. Thoben Klaus-Dieter, Homburg Nils. *Maritime Life Cycle Management during ship operation*. Conference: Product Lifecycle Management PLM'09 (PLM-SP5 – 2009 Proceedings) 2009. At: Bath, UK, Inderscience Publishers. P. 358 – 368

16. Gratsos G., Psaraftis H., Zachariadis P. *Life Cycle Cost of Maintaining the Effectiveness of a Ship's Structure And Environmental Impact Of Ship Design Parameters: An Update*. 2009. P.169-182 DOI: 10.3940/rina.bc.2009.11.

17. Melnyk O., Onyshchenko S. *Navigational safety assessment based on Markov-model approach*. *Pomorstvo*, 2022. 36(2), P. 328-337. DOI: 10.31217/p.36.2.16

18. Koskina, Y., Onyshenko, S., Drozhzhyn, O., Melnyk, O. *Efficiency of tramp fleet operating under the contracts of affreightment*. *Zeszyty Naukowe. Transport /Politechnika Śląska*. 2023. (120). DOI: 10.20858/sjsutst.2023.120.9.

19. Onyshchenko S., Onyshchenko A. *Dry bulk freight market research based on correlation and regression analysis*. *Розвиток методів управління та господарювання на транспорті*. 2022. 2(79), С. 5-17 DOI: 10.31375/2226-1915-2022-2-5-17

20. Onyshchenko S. P. *Ensuring the given level of the voyage efficiency considering the risks factors associated with the charter party terms*. *Вісник Приазовського державного технічного університету. Серія : Технічні науки*. 2018. Вип. 37, С. 192-201 DOI: 10.31498/2225-6733.37.2018.160296

21. Vyshnevskiy D., Vyshnevskaya O., Onyshchenko S. *Modeling of the distribution of the vessels' time budget under long-term freight contracts within conditions of uncertainty*. *Розвиток методів управління та господарювання на транспорті*. 2019. Vol. 69 (4), P. 15–25 DOI: 10.31375/2226-1915-2019-4-15-25

Shumylo O.M. TECHNICAL AND ECONOMIC ASPECTS OF THE VESSEL LIFE CYCLE MANAGEMENT

Life cycle management of the vessel is a necessary component in the fleet operation and managing system. Determination of the essence, stages, composition and dynamics of the main vessel life cycle indicators – technical and economic – forms the basis for the further development of models and methods for substantiating the type and option of modernization. The vessel operation within the specified period is connected with two main aspects – technical and commercial. A balance of all costs and benefits should underlie life cycle management decisions from a commercial point of view, as well as security (risk minimization) from a technical point of view.

The main existing views on the vessel life cycle stages are characterized. It is established that, in fact, for many ship owners, life cycle management is narrowed down to the operational phase management. A generalized scheme of the vessel life cycle has been formed as a combination of the vessel life cycles for the ship owners chain. The essence of the category "life hope" in the application for shipping is characterized, namely, the correspondence of this category to the vessel life cycle operational stage. The existing concepts LCC (Life cycle cost) and LCA (Life cycle assessment) were analyzed according to shipping particularities. A system of factors that affect the actual life of vessels and the possibility of its extending has been formed. An integrated system of indicators reflecting the results of the technical and commercial operation is proposed. The general

dynamics of these indicators during the vessel life cycle have been established. This system of indicators covers technical and commercial risks, as well as, in accordance with modern trends, the accumulated "damage" to the environment within the LCA (Life cycle assessment) concept. The proposed results form the basis for life cycle monitoring and further research on issues related to the vessel life cycle management taking into account both its technical and economic aspects.

Key words: *vessel life cycle management, commercial and technical operation, risks, efficiency, shipping safety.*

БУДІВНИЦТВО

УДК 625.7

DOI <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2024.2/48>**Аринушкіна Н.С.**

Харківський національний автомобільно-дорожній університет

Грищенко Т.М.

Харківський національний автомобільно-дорожній університет

УКРІПЛЮВАЛЬНІ РОБОТИ ПРИ БУДІВНИЦТВІ ЗЕМЛЯНОГО ПОЛОТНА АВТОМОБІЛЬНИХ ДОРІГ

У статті розглянуто питання укріплення укосів земляного полотна автомобільних доріг та конусів великих штучних споруд.

Комплекс опоряджувальних робіт складається з планування укосів, бокових каналів і дна резервів, а також їх укріплення від розмивання водою та видування вітром. Укріплення укосів суттєво впливає на стійкість і довговічність земляного полотна.

Ці роботи виконують після виконання основних робіт спеціалізованим загonom. Для планувальних робіт використовують в основному автогрейдери та екскаватори-драглайни з звичайним або спеціальним обладнанням.

Конструкції укріплення земляного полотна вибирають в залежності від характеру дії природних факторів (швидкості води, вітру), кліматичних умов, властивостей ґрунтів земляного полотна, наявності місцевих матеріалів придатних для укріплення, можливості механізації робіт з урахуванням розмірів та ухилів укосів [1].

Найбільш поширеним та економічним типом укріплення є створення дернового покриву шляхом висівання трав. Використовують також укріплення шарами ґрунту, обробленого органічними в'язучими, окремими залізобетонними елементами, суцільними шарами з цементу – або асфальтобетонних сумішей, тощо.

Для укріплення укосів глибоких виїмок та високих насипів використовують решітчасті укріплення з збірних залізобетонних елементів, на підходах до мостів та конусах шляхопроводів влаштовують суцільні захисні шари з збірного або монолітного залізобетону.

Окрім традиційних видів укріплення укосів земляного полотна використовують різні геосинтетичні матеріали та габіони.

Габіонні конструкції представляють собою об'ємні контейнери з металевої оцинкованої сітки подвійного кручення.

Геосинтетичний матеріал (geosynthetic) – загальний термін, який описує рулоний, стрічковий або об'ємний (у вигляді трьохмірної структури) матеріал, один із компонентів якого виконаний із синтетичного або натурального полімеру, який використовують у контакті із ґрунтом і (або) іншими матеріалами в дорожньому, геотехнічному та цивільному будівництві [2,3].

Стаття присвячена застосуванню сучасних матеріалів для укріплення укосів для забезпечення надійного функціонування автомобільної дороги або окремих її елементів в складних умовах будівництва та експлуатації, а також розглянуто технічні та економічні переваги по відношенню до традиційних рішень.

Ключові слова: укріплення укосів, автомобільна дорога, георешітки, геомати, габіони.

Постановка проблеми. З метою запобігання руйнування укосів в процесі експлуатації автомобільних доріг, від дії періодично повторюваних циклів промерзання і відтавання, зволоження і висихання знижується опір ґрунту зрушенню та

відбувається їх руйнування, тому використання геосинтетичних матеріалів та габіонів є пріоритетними матеріалами для укріплювальних робіт.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Питаннями застосування сучасних матеріалів

для укріплювальних робіт на дорогах займались вчені Савенко В.Я., Петрович В.В., Каськів В.І., Усиченко О.Ю., Гамеляк І.П., Кострицький В.В., Артеменко Л.Ф., Дробішинець С.Я.

Питання вивчення використання сучасних матеріалів відображені в роботах вітчизняних та зарубіжних вчених [4–10].

Постановка завдання. На сучасному етапі будівництва автомобільних доріг для укріплення укосів земляного полотна широко застосовуються габіони та різні геосинтетичні матеріали які об'єднує зручна форма поставки (рулони, блоки, плити), можливість забезпечення високої якості геосинтетичного матеріалу в умовах заводського виготовлення, тобто можливість створення додаткових шарів (прошарків) гарантованої якості при мінімальних трудовитратах на місці виконання робіт та мінімальних відносних транспортних втратах. Їх призначення, область застосування та виконання функцій різноманітні.

Метою є аналіз існуючих сучасних методів та матеріалів а також перспективи застосування їх для укріплення укосів земляного полотна автомобільних доріг.

Виклад основного матеріалу. Різноманітні сучасні матеріали в міжнародній практиці будівництва широко застосовуються вже тривалий час.

Геосинтетичні матеріали це клас будівельних матеріалів, що розрізняються за структурою, технологією виробництва, показниками властивостей, складом сировини та можуть бути представлені у вигляді полотен, сіток, решіток, об'ємних виробів, геоматів, тощо [2].

Геосинтетичні матеріали виготовляють за різною технологією та з використанням різної сировини, вони повинні відповідати призначенню і місцевим умовам використання.

В процесі виконання укріплювальних робіт при будівництві земляного полотна застосо-

вують: об'ємні решітки, геомати, габіони та матраци Рено.

Георешітка – це геосинтетичний матеріал, виконаний у вигляді сотової конструкції з високою осередків від 5 до 20 см та отриманий шляхом скріплення між собою суцільних або перфорованих полімерних стрічок, які з'єднані зварним швом [4].

При розтягуванні даної конструкції в робоче положення, геосоти утворюють об'ємне 3D полотно з сотовою структурою, які здатні розтягуватися та утримувати форму, як по вертикалі, так і по горизонталі. Покривна площа модуля георешітки з перфорацією може становити від 15 до 25 квадратних метрів.

Загальний комплекс технологічних процесів зміцнення поверхні укосів із застосуванням об'ємної георешітки включає: підготовчі роботи, розбивочні роботи, укладання нетканих рулонних синтетичних матеріалів та їх закріплення на поверхні укосу, укладання георешітки з фіксацією монтажними анкерами, укладання в осередки георешітки матеріалу заповнювача, розрівнювання, планування та ущільнення матеріалу заповнювача; висівання насіння трав у разі заповнення осередків об'ємної георешітки рослинним ґрунтом [5].

Укріплення укосів та конусів шляхопроводів георешіткою наведено на рис. 1.

Перевагами застосування георешіток є: легкість транспортування, швидкий монтаж, можливість використання для укладання на криволінійній поверхні, довговічність, можливість комбінації з озелененням.

Недоліком застосування георешіток є можливість використання для зміцнення укосів з кутом нахилу до 60 градусів.

Геомат – це еластичний дрібнопустотний матеріал з хаотично переплетених полімерних ниток (поліпропіленових або поліамідних).



Рис. 1. Укріплення укосів та конусів шляхопроводів георешіткою

Геомати призначені для захисту укосів від ерозійних процесів (вимивання дощовою водою), відновлення родючого шару та рослинного покриву, а також захисту берегів водойм з ухилом до 35 градусів.

У своїй структурі, геомати мають більше 90 % порожнин, що дозволяє акумулювати на собі частинки ґрунту та перешкоджає ерозії поверхневого шару ґрунту. Заповнення порожнеч геомата ґрунтом сприяє росту трав'яного покриву та надає укріпленому укосу природного вигляду.

Технологія укладання геомату дуже проста – планування ґрунту, розкочування геомату на укосі, з'єднання в нахлист сусідніх смуг, встановлення анкерів і засипання тонким шаром ґрунту. Висаджена трава кореневищами проростає через геомат і дуже надійно закріплює його на укосі. Укріплення укосів геоматами представлено на рис. 2.



Рис. 2. Укріплення укосів геоматами

Поверхня на яку планується укладання геомату має бути спланована, а також очищена від будівельного сміття, каміння та інших матеріалів для забезпечення щільного прилягання геомату до поверхні.

Для анкерування геомату у верхній та нижній частинах укосу на відстані 0,3 м зверху та знизу укосу влаштовується анкерна траншея глибиною 0,2–0,3 м.

Рулон геомату укладається та закріплюється за допомогою анкерів на верхній кромці укосу, після чого розкочується вниз на всю довжину укосу, розправляється, натягується по всій довжині та прикріплюється внизу анкерами до ґрунту.

Після закріплення виконують засипку анкерних траншей ґрунтом з подальшим ущільненням.

Укладання геомату виконують в нахлист для запобігання його підмиванню водою, що стікає по укосу та забезпечує максимальну надійність конструкції при зміцненні укосів.

Засипання геомату рослинним ґрунтом виконують з таким розрахунком, щоб після його ущільнення та заповнення над його поверхнею зали-

шався рослинний ґрунт товщиною 5–6 см. Для кращого заповнення геомату рослинним ґрунтом та його закріплення на поверхні укосу виконується ущільнення за допомогою ручних трамбівок або ручного гладковальцевого котка.

Перевагами застосування геомату є легкість транспортування і монтажу, довговічність, використання для зміцнення укосів з кутом нахилу до 70 градусів.

Недоліком застосування геомату з озелененням є збільшення вартості робіт на ділянках з неродючим ґрунтом.

Для укріплення укосів використовують також габіонні конструкції (об'ємні контейнери з металевої оцинкованої сітки подвійного кручення, з шестикутними осередками, при виготовленні плетених габіонів і квадратними осередками, при виготовленні зварних габіонів). Подвійне кручення забезпечує цілісність, міцність, рівномірний розподіл навантаження та запобігання розкручування в разі розривання сітки.

Габіони поділяються на коробчасті, коробчасті з армуючою панеллю, матраці, циліндричні.

Габіонні конструкції виробляються в заводських умовах із дроту з антикорозійним покриттям і призначені для подальшого заповнення кам'яними матеріалами.

При виготовленні плетених габіонів використовують оцинкований дріт діаметром 2,7 або 3,0 мм, а при виготовленні зварних габіонів – 8 мм. Для довговічності таких конструкцій вміст цинку у дроті має бути не менше 260 г/м².

При влаштуванні габіонних споруд у особливо корозійному середовищі використовуються габіони з полівінілхлоридним (ПВХ) покриттям (оцинкований дріт сітки покривається оболонкою з ПВХ товщиною 0,4–0,6 мм).

Для встановлення габіонів необхідно, щоб поверхня біля підшви укосу була рівною та ущільненою для запобігання просіданню в процесі експлуатації.

Монтаж габіонів нескладний та невитратний за часом. Модулі викладаються рядами, утворюючи стінку і скріплюються між собою як у цегляній кладці.

До переваг застосування габіонів відноситься максимальна ефективність укріплення, максимальна стійкість до навантаження, тривалий термін експлуатації, можливість застосування при зміцненні вертикальних схилів.

Недоліком застосування габіонів є використання спеціальної будівельної техніки при виконанні монтажних робіт.

Укріплення природніх укосів габіонами представлено на рис. 3.

При використанні матраців Рено (плоскі габіонні конструкції), можливе укріплення укосів з ухилом до 45 градусів. Ширина одного матраца становить 2 м, довжина – від 3 м до 6 м, висота – від 17 см до 30 см.

Зміцнення укосів матрацами Рено дозволяє повністю захистити ґрунт від будь-яких механічних впливів – вимивання, обсіпання, гравітаційних зрушень. Кам'яний матеріал матрацу уповільнює потоки води на укосах і захищає від ударів дощу, проте дозволяє воді вільно просочуватися.

Встановлення матраців потребує рівної поверхні. Як розділовий шар між ґрунтом і габіонами укладається геотекстиль. При великих об'ємах робіт роботи проводяться з використанням будівельної техніки.

До переваг застосування відноситься ефективність роботи, стійкість до навантажень, великий термін експлуатації, до недоліків – складність

монтажу та використання на укосах з кутом ухилу до 45 градусів.

Укріплення укосів насипів та конусів мостів наведено на рис. 4.

Висновки. Економічна перевага застосування сучасних матеріалів для укріплювальних робіт обумовлена зниженням матеріалоемності традиційних ґрунтових матеріалів або залізобетону, вартість яких підвищується з кожним роком в зв'язку з тим, що природні ресурси обмежені та збільшується вартість транспортування.

Геосинтетичні матеріали набули великої популярності завдяки розширенню їх асортименту та напрямів застосування, появи нових прогресивних способів і технологій виробництва, використанню нових видів сировини.

Таким чином виробництво та використання таких матеріалів поліпшить екологічний стан навколишнього середовища, попередить виникнення вітрової та водної ерозії укосів земляного полотна, які є основною причиною деформації земляного полотна та руйнування автомобільної дороги в цілому.



Рис. 3. Укріплення природніх укосів габіонами



Рис. 4. Укріплення укосів насипів та конусу мостів матрацами Рено

Список літератури:

1. ДБН В.2.3-4:2015. Автомобільні дороги. Частина І. Проектування. Частина ІІ. Будівництво. [Чинний від 2016-04-01]. Київ, 2015. 104 с.
2. ГБН В.2.3-37641918-544:2014. Автомобільні дороги. Застосування геосинтетичних матеріалів у дорожніх конструкціях. Основні вимоги. [Чинний від 2015-01-01]. Київ, 2014. 143 с.
3. Посібник № 1 з проектування земляного полотна і дорожніх одягів із застосуванням геосинтетичних матеріалів (до ГБН В.2.3-37641918-544:2014). Київ. Укравтодор, 2015. 133 с.
4. Першаков В.М., Белятинський А.О., Стефашина Н.М. Використання геосинтетичних армуючих прошарків в дорожньому будівництві. *Науково-технічний збірник. Проблеми розвитку міського середовища*. 2020. № 2(25). С. 130–149.
5. Дробишинець С.Я. Геотекстиль у дорожньому будівництві, шляхи використання. *Міжвузівський збірник. Наукові нотатки*. Луцьк, 2014. № 46. С. 254–260.
6. Кушнір О.В., Катукова В.М. Інновації в дорожньому господарстві України. *Дороги і мости*. Київ, 2014. № 14. С. 21–27.
7. Гамеляк І.П., Кострицький В.В., Артеменко Л.Ф. Проблеми використання геосинтетичних матеріалів у дорожньому будівництві та шляхи їх вирішення. *Вісник КНУДТ*. 2009. № 6. С. 17–27.
8. Шевчук В.Р., Журба Г.В. Міжнародна конференція з геосинтетики: Сучасні напрямки розвитку. *Автомобільні дороги України*. 2006. № 6. С. 38–40.
9. Савенко В.Я., Петрович В.В., Каськів В.І., Усиченко О.Ю. Синтетичні матеріали – перспектива використання в дорожніх конструкціях. *Автомобільні дороги і дорожнє будівництво*. 1999. № 57. С. 143–153.
10. Koerner R.M. *Designing with Geosynthetics*. – New Jersey. 5th, 2005. 796 p.

Arinushkina N.S., Hryshchenko T.M. REINFORCEMENT WORKS DURING THE CONSTRUCTION OF THE EARTH SURFACE OF AUTOMOBILE ROADS

The article deals with the issue of strengthening the slopes of the ground surface of highways and the cones of large man-made structures.

The complex of landscaping works consists of the planning of slopes, side ditches and the bottom of reserves, as well as their strengthening against erosion by water and blowing by wind. Reinforcement of slopes significantly affects the stability and durability of the ground surface.

These works are performed after the main work is done by a specialized squad. Motor graders and dragline excavators with conventional or special equipment are mainly used for planning work.

Constructions for strengthening the earth bed are chosen depending on the nature of the action of natural factors (water speed, wind), climatic conditions, properties of the earth bed soil, the availability of local materials suitable for strengthening, the possibility of mechanization of works taking into account the dimensions and slopes of slopes [1].

The most common and economical type of fortification is the creation of a turf cover by sowing herbs. Reinforcement with layers of soil treated with organic binders, separate reinforced concrete elements, continuous layers of cement or asphalt concrete mixtures, etc. are also used.

Lattice reinforcements made of prefabricated reinforced concrete elements are used to strengthen the slopes of deep trenches and high embankments, continuous protective layers of prefabricated or monolithic reinforced concrete are arranged on approaches to bridges and overpass cones.

In addition to the traditional types of reinforcement of the ground slopes, various geosynthetic materials and gabions are used.

Gabion structures are volumetric containers made of double-twisted galvanized metal mesh.

Geosynthetic material (geosynthetic) is a general term that describes a roll, tape or volumetric (in the form of a three-dimensional structure) material, one of the components of which is made of a synthetic or natural polymer, which is used in contact with the soil and (or) other materials in road, geotechnical and civil construction [2,3].

The article is devoted to the application of modern materials for strengthening slopes to ensure the reliable functioning of the road or its individual elements in difficult construction and operation conditions, as well as technical and economic advantages in relation to traditional solutions are considered.

Key words: reinforcement of slopes, road, geogrids, geomats, gabions.

ЕЛЕКТРОНІКА

УДК 004.31

DOI <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2024.2/49>

Карягін Г.Є.

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

Корнєв В.П.

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

ВИМІРЮВАЛЬНО-СИГНАЛІЗАЦІЙНИЙ КОМПЛЕКС СЕЙСМІЧНОГО ТИПУ

Стаття спрямована на вирішення задачі оцінки загальної маси та швидкості руху транспортних засобів, а також визначення їх технічних особливостей (кількість осей підвіски та інше) без припинення руху транспортного засобу різної маси та габаритів. Задача вирішується шляхом використання сенсорів сейсмічного типу – геофонів. Автором розроблено функціональну модель пристрою, здатного оцінити масу, швидкість та встановити напрямок руху транспортного засобу, який рухається шляхами загального призначення. Створено програмне забезпечення на мові програмування Python для керування функціями мікрокомп'ютера Raspberry Pi та додаткової периферії, що дозволяє обмін інформацією між мікрокомп'ютером та геофонами. Також була створена програма аналізу результатів отриманих від вимірювальної частини системи.

Запропонована система є придатною для використання відповідними державними службами при проведенні контролю маси та швидкості наземних транспортних засобів оскільки створює можливість проводити попередню об'єктивну оцінку повної маси транспортного засобу і прийняти рішення про необхідність зупинки для подальшого проведення стандартної процедури зважування. Це безумовно посприяє підвищенню надійності запобігання пересуванню перенавантажених транспортів шляхами України, і тим самим збільшенню періоду безпечної експлуатації доріг, а також і суттєвому зниженню втрат товаро-перевізників та збереженню часу та зусиль контролюючих органів внаслідок зменшення кількості невинуватих затримок вантажів. Важливо і те, що за дана системи дає можливість проводити статистичне дослідження навантаження певних ділянок автошляхів для планування ремонтних робіт та попередження виникнення аварійно небезпечних ситуацій на дорогах.

Ключові слова: геофон, оцінка маси та швидкості, транспортний засіб, хвильові форми, мікрокомп'ютер Raspberry Pi.

Постановка проблеми. Задача моніторингу трафіку руху та параметрів наземного транспорту автомобільними шляхами є актуальною як для України, так і для будь-якої країни світу [1]. Державні та прикордонні служби застосовують різні методи та апаратуру для вимірювання маси транспортних засобів та швидкості їх руху. Але, якщо вимірювання швидкості є достатньо усталеною процедурою, що забезпечена технічним оснащенням та регламентується відпрацьованою законодавчо-нормативною базою, то для вимірювання маси транспортних засобів використовують зазвичай спеціально відведені місця та/або бокси, обладнані спеціалізованими

зважувальними приладами [2]. Зазначимо, що забезпечення можливості проведення регулярного контролю маси транспортних засобів (особливо вантажних) і моніторингу інтенсивності їх руху шляхами загального призначення є важливою умовою належної експлуатації дорожнього покриття автошляхів, ґрунтового планування і своєчасного проведення ремонтних робіт дорожнього покриття. Все це сприяє збільшенню періоду безпечної експлуатації доріг та врешті економії коштів, що в масштабах країни має суттєве значення.

Одним з чинників руйнування дорожнього покриття є механічний вплив автотранспорту на

дорожнє покриття (тиск великої маси вантажного автомобіля, яка передається на поверхню дороги через колісну пляму контакту). Особливо цей руйнівний ефект проявляється у спекотну пору року, коли асфальтове покриття розігрівається до температур, за яких стає найбільш вразливим. Для зниження руйнівного впливу багатотоннажних автомобілів на поверхню дороги влітку вводиться обмеження на пересування транспорту з повною масою більше 38(40) тон [3]. Контроль повної маси вантажного автомобіля є однією з найважливіших умов збереження автомобільних доріг в належному стані. Отже, пошук технічних засобів визначення таких параметрів транспортних засобів, як маса, швидкість та тип (легкові, вантажні, кількість осей підвіски) у автоматичному режимі без припинення їх руху є актуальною задачею.

Аналіз наявних досліджень і публікацій.

На сьогоднішній день для контролю додержання вимог по навантаженню транспортні служби проводять вибірковий контроль маси вантажних автомобілів на спеціально оснащених стаціонарних пунктах зважування. При проведенні такої процедури спочатку за непрямыми ознаками обирають вантажний автомобіль для перевірки, зупиняють його і вже потім проводять зважування.

Цей підхід має певні недоліки:

по-перше, необхідно обов'язково зупиняти автомобіль та затримувати його для проведення процедури зважування. Це завдає певних незручностей і втрат від затримки у доставці комерційного вантажу, а у випадках, коли результат зважування показуватиме відсутність перевищення дозволеної маси, ці вимушені затримки транспорту і витрати часу та зусиль персоналу на проведення процедури перевірки будуть не виправданими;

по-друге, оскільки рішення про зупинку транспорту уповноважена людина приймає на основі непрямих суб'єктивних суджень, то існує ймовірність пропустити (не виявити) транспортний засіб з перевищенням граничного значення ваги (40 т), що врешті спричинятиме ще більші втрати.

Наявні методи вирішення задачі оцінки напруженості транспортного потоку здебільшого засновані на застосуванні акустичних сенсорів [4]. Даний підхід не дає можливість оцінювати масо-швидкісні показники автомобілів, що рухаються, а тільки виявляє їх певні технічні характеристики. Інші методи теж дають можливість лише зафіксувати факт руху транспортних засобів або їх присутності [4,5], не надаючи ніякої інформації про їх масу.

Постановка завдання. Метою статті є надати наукові і технічні основи створення системи автоматизованого попереднього визначення параметрів транспортних засобів (маса, швидкість) без припинення їх руху.

Виклад основного матеріалу

Ідея рішення задачі і її технічна реалізація

Ідея підходу до визначення маси транспорту полягає в спробі кількісно оцінити сейсмічні прояви, спричинені вібраційним впливом, який створює цей транспортний засіб на поверхню дороги під час його руху по ній.

Дійсно, під час руху транспортний засіб створює вібраційний вплив на поверхню, який передається від центру маси на покриття дороги через пляму контакту (колеса) [2,6]. Вібрації великої маси створюють поверхневі сейсмічні хвилі, які здатні розповсюджуватись на декілька кілометрів від джерела збудження. Амплітуда сейсмічних хвиль пропорційна масі рухомого засобу та відстані від джерела вібрації.

Таким чином, якщо поблизу дорожнього покриття розмістити сенсори, які діють на сейсмічному принципі, то за амплітудою поверхневих хвиль від рухомого транспорту можна вимірювати його масу. В якості таких сенсорів можуть виступати геофони, які знайшли широке використання в геологорозвідці [5]. Пікове значення хвильового сейсмічного сигналу буде відповідати найбільшому наближенню транспортного засобу до місця розміщення приладу реєстрації. Якщо ж вздовж дороги на фіксованій відстані розмістити два сейсмічні пристрої(геофони) і визначити тривалість часу між піковими значеннями амплітуд отриманих від них сигналів сейсмічних коливань, то стане можливим оцінити середню швидкість руху транспортного засобу на цьому відрізку шляху за відомою формулою:

$$V = \frac{d}{t_2 - t_1}, \quad (1)$$

де: t_1 , t_2 – моменти часу, які відповідають піковим значенням сигналу двох геофонів; d – відстань між геофонами в метрах.

Схема розміщення сейсмічних пристроїв для проведення вимірювання показана на рис. 1. Пікові значення сигналів А1 та А2 пропорційні масі транспортного засобу.

Для виявлення моменту часу надходження максимуму сигналу, який відповідає одному і тому ж транспортному засобу в автомобільному потоці, можна застосувати взаємну кореляційну функцію від двох записів сигналів геофонів:

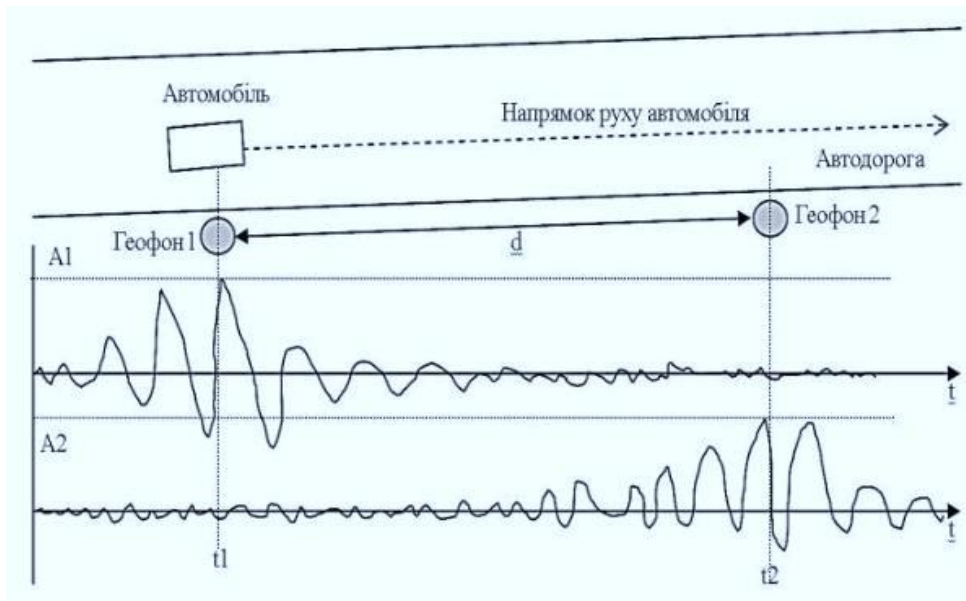


Рис. 1. Схема розміщення сейсмічних пристроїв (геофонів) вздовж автомобільного шляху та приклад запису хвильових форм на геофонах 1 та 2. A1 та A2 – пікове значення сигналу з геофонів 1 та 2. Моменти часу t1 та t2 відповідають піковим значенням сигналів з геофонів

$$S(\Delta t) = \frac{\sum_{i=t_2}^{t_1} [A(i) * B(i + \Delta t)]}{t_2 - t_1} \rightarrow \max, \quad (2)$$

де: A, B – дискретні масиви значень сейсмічних сигналів у задані дискретні моменти часу;

t_1, t_2 – моменти часу, які відповідають піковим значенням сигналів від геофонів;

Δt – інтервал часу між записом сигналу з другого геофону відносно першого.

Для визначення відповідності між отриманим піковим значенням сигналу від геофона та масою рухомого транспортного засобу необхідно провести початкове калібрування пристрою. Для цього вантажний автомобіль з відомим показником повної маси на різних швидкостях проїжджає по конкретному відрітку дороги, де розміщені геофони. Після цього виконується вимірювання пікових значень, які заносяться до таблиці результатів досліджень, за статистичною обробкою яких створюється таблиця налаштувань (юстировки) пристрою.

Для перевірки правильності теоретичних міркувань та оцінки потенційних можливостей системи створено функціональну модель вимірювально-сигналізаційного комплексу сейсмічного типу (ВСКСТ).

Модель ВСКСТ має такі основні елементи (рис. 2):

- геофони;
- двоканальний АЦП;
- мікрокомп'ютер;
- програма роботи з АЦП;

– програма обробки інформації.

Для перевірки прийнятих рішень шляхом проведення натурального експерименту створено макет ВСКСТ на основі мікрокомп'ютера Raspberry Pi. В якості програмного середовища встановлено операційну LINUX-подібну систему RASPBIAN. Для підтримки роботи прецизійного багатоканального 24-розрядного АЦП WaveShare [8], під'єданого до мікрокомп'ютера, написана програма на мові програмування Python.

Завдання програми роботи з АЦП:

- оцифрувати аналогові сигнали від геофонів;
- записати отримані дані в текстовий файл.

Робота з отриманими даними (текстовим файлом) проводилась іншою програмою, яка дозволяє відобразити оцифровані дані хвильових форм на екрані комп'ютера, а також проводити масштабування та фільтрацію даних за допомогою смугового фільтру Баттерворта. Програма написана на мові Object Pascal в середовищі Delphi 7,0 [9].

Експериментальне дослідження

Тестування виготовленого експериментального макету ВСКСТ проводилося у січні 2021 року на ділянці дороги, яка з'єднує селище Клавдієве (Бородянський р-н., Київська обл.) з трасою Київ-Ковель. Географічні координати місця проведення експерименту: +50,5931 Пн.ш +30,010823 Сх.д. Цей відрізок був обраний тому, що автомобільний трафік на ньому досить помірний, що дозволило отримати якісні дані для запису в файл.

Геофони були розміщені вздовж автошляху на відстані 39 метрів один від одного. Відстань від гео-

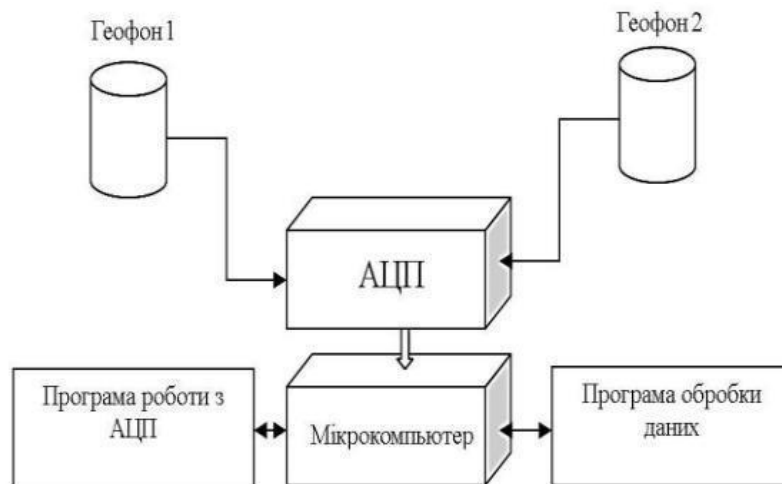


Рис. 2. Структурна схема вимірювально-сигналізаційного комплексу сейсмічного типу



Рис. 3. Запис хвильових форм з двох геофонів

фонів до дорожнього покриття – 1 м. Частота квантування АЦП – 30 Гц. Дана частота була обрана з декількох міркувань. По-перше, частота вібрацій основних елементів вантажного транспорту (силовий агрегат, рама, підвіска) знаходиться в межах від 5 до 12 Гц. По-друге, розмір записаних файлів даних мав невеликий об'єм, що на момент проведення експерименту мало важливе значення.

В ході реєстрації даних були отримані файли з хвильовими формами від автомобілів, що рухаються на даній ділянці автошляху. На рис. 3 показаний файл даних для вимірювання тривалістю 3 хвилини.

Хвильові форми від двох геофонів відрізняються кольорами: зелений колір – геофон № 1, червоний – геофон № 2. В нижньому вікні наведено відфільтровані в смузі частот від 5 до 15 Гц.

На графіку відфільтрованих хвильових форм (рис. 4) можна виділити 5 сигналів від автомобілів, що рухались повз геофони, вздовж лінії їх розташування.

З рисунку 4 можна побачити, що першим зреагував геофон № 1 (червоний колір), другим – геофон № 2 (зелений колір). Порядок реагування геофонів свідчить про те, що автомобіль рухався в напрямку виїзду з міста. Пікове значення сигналу (точка, що відповідає найменшій відстані від геофона до автомобіля) на геофоні № 1 відповідає відліку 1480, на геофоні № 2 – 1555. Така відстань між відліками АЦП (75) відповідає проміжку часу у 2,5 секунди. При відстані між геофонами, яка дорівнює 39 м, швидкість руху автомобіля можна розрахувати як 15,6 м/с (56,2 км/год).

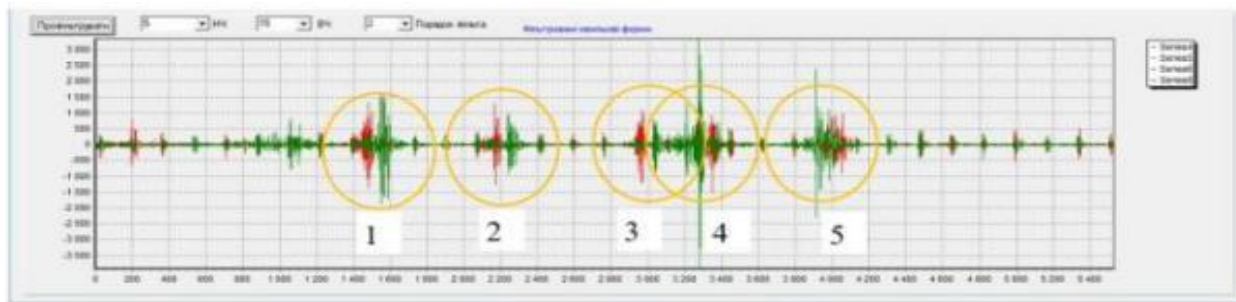


Рис. 4. Сигнали від автомобілів №№ 1-5 виділені помаранчевими колами

Таблиця 1

Розраховані параметри руху транспортних засобів

№	Тип автомобіля	Напрямок руху	Різниця часу між сигналами від геофонів, відліків (секунд)	Оцінена швидкість км/год	Амплітуда сигналу (квантів)
1	Легковик	З міста	75 (2,5)	56,16	3400
2	Легковик	З міста	73 (2,43)	57,78	2400
3	Легковик	З міста	76 (2,53)	55,49	2300
4	Автобус	До міста	74 (2,46)	57,07	6900
5	Легковик	До міста	85 (2,85)	49,26	4700

Серед п'яти корисних сигналів, записаних від автомобілів, сигнали №№ 1, 2, 3, 5 були створені легковими автомобілями. Сигнал № 4 був створений міським автобусом.

З рисунку 4 також видно, що пікові значення сигналів від легкових автомобілів майже однакові та лежать в межах 2500–3500 відліків вимірюваного сигналу. Повна маса легкового складає від 1500 до 3500 кг. Амплітуда сигналу № 4 від автобусу значно більша (7000–7500 відліків) внаслідок більшої рухомої маси порівняно з легковим автомобілем. Маса автобусу складає від 3500 до 7600 кг. Це підтверджує гіпотезу стосовно існування певної кореляції між рухомою масою автомобіля та піковим значенням сигналу. Також на рисунку 4 можна побачити, що пікове значення сигналу від легкового на геофоні № 1 починає перевищувати сейсмічний фон на відліку 1380. Пікове значення відповідає відліку 1480

Розраховані під час експерименту параметри автомобілів наведено у таблиці 1.

Отже, геофон починає реагувати на поверхневій коливання землі на відстані приблизно 130 м від пункту реєстрації. В даному експерименті, автобус був зафіксований за 234 м до пункту реєстрації.

Висновки. У роботі запропоновано спосіб оцінки характеристик транспортних засобів без їх зупинки шляхом аналізу сейсмічних відгуків від пари геофонів. Створено програмно-апаратне

рішення, що реалізує запропонований підхід. Зокрема, створено програмне забезпечення для вимірювання сейсмічних відгуків від пари геофонів з використанням мікрокомп'ютера Raspberry Pi та 24-розрядного АЦП. Розроблено програмне забезпечення для аналізу та візуалізації вимірних сейсмічних відгуків.

Дієвість запропонованого рішення підтверджена результатами експериментальних досліджень.

Запропонованим методом можна без припинення руху транспортного засобу оцінити такі параметри: дата, час, напрямок і швидкість руху та загальна маса транспорту.

Чутливість для даної ділянки бетонної дороги при розміщенні сейсмічних сенсорів на відстані 39 м для легкового транспорту складає 100–150 м (корисний сигнал починає перевищувати фон), для вантажного транспорту ця відстань складає 200–400 м. Показник чутливості пропорційно залежить від швидкості пересування транспорту, його маси та властивостей дорожнього покриття.

Одночасно виявилось, що чутливість для реєстрації людини (пішохода) складає 30–40 м. По довжині кроку можна оцінити вік, стать та зріст людини, що є предметом подальших досліджень.

Запропонована система є придатною для використання відповідними державними службами при проведенні контролю маси та швидкості

наземних транспортних засобів оскільки створює можливість проводити попередню об'єктивну оцінку повної маси транспортного засобу і прийняти рішення про необхідність зупинки для подальшого проведення стандартної процедури зважування. Це безумовно посприяє підвищенню надійності запобігання пересуванню перенавантажених транспортів шляхами України, і тим самим збільшенню періоду безпечної експлуатації доріг,

а також і суттєвому зниженню втрат товаро-перевізників та збереженню часу і зусиль контролюючих органів внаслідок зменшення кількості невинуватених затримок вантажів.

Важливо і те, що дана система дає можливість проводити статистичне дослідження навантаження певних ділянок автошляхів для планування ремонтних робіт та попередження виникнення аварійно небезпечних ситуацій на дорогах

Список літератури:

1. Ваговий контроль на автошляхах України. Вагові норми вантажних перевезень, порядок здійснення контролю та відповідальність за їх порушення. Підготовлено адвокатом Пономарьовим М.М. /Свідоцтво про право на зайняття адвокатською діяльністю № 4915 від 27.03.2012, на замовлення Асоціації "Аграрних перевізників України". URL: <http://artimmer.com/ua/publicacii/%D0%BF%D1%80%D0%B0%D0%B2%D0%BE%D0%B2%D0%B8%D0%B9-%D0%BB%D1%96%D0%BA%D0%B1%D0%B5%D0%B7/268-vagovij-kontrol%60-na-avtoshlyхах-ukra%D1%97ni> (Інформація актуальна станом на травень 2016 року).
2. Габаритно-ваговий контроль в Україні та СНГ: вимоги до автотранспорту та реалії перевірок. URL: <https://ua.transportica.com/blog/gabatitno-vesovoj-kontrol-v-ukraine-i-sng/>
3. User Guide RDC setup and deployment. *Digital Barriers plc*. Version 2.0 August 2018.
4. Охоронна система Sensoguard. URL: <https://www.sensoguard.com/> (дата звернення 25.01.2024р.)
5. Охоронна система Гофер. URL: <http://gofer.ua/product/oxranna-ya-sistema/> (дата звернення 25.01.2024р.)
6. В.С. Гавриш. Аналіз методів оцінки транспортної вібрації в межах зон впливу автомобільних доріг. *Міжвузівський збірник "Наукові нотатки"*. Луцьк, 2014. Випуск № 45 ©В.С. Гавриш 108 УДК 625.72
7. Юшков Б.С., Сергієв А.С. Вплив вібрації на основі автомобільної дороги на схилі. *Сучасні проблеми науки та освіти*. – 2015. № 2-2.
8. Опис плати АЦП Waveshare. URL: <https://www.waveshare.com/wiki/File:High-Precision-AD-DA-User-Manual.pdf> (дата звернення 25.01.2024)
9. Текст програми для перегляду хвильових форм записаних в файл URL: <https://github.com/glib2002/Waveforms-wieverV1.0-for-geophone-/blob/master/Wavewiever.pas> (дата звернення 25.01.2024)

Kariahin G.Ye., Kornev V.P. SEISMIC-TYPE MEASURING AND SIGNALING COMPLEX

The article is aimed at solving the problem of estimating the total weight and speed of movement of vehicles, as well as determining their technical features (number of suspension axles, etc.) without stopping the movement of vehicles of different weights and dimensions. The task is solved by using seismic-type sensors – geophones. The author has developed a functional model of a device capable of estimating the mass, speed, and direction of a vehicle moving on general purpose roads. Software in the Python programming language was created to control the functions of the Raspberry Pi microcomputer and additional peripherals, which allows the exchange of information between the microcomputer and geophones. A program for analyzing the results obtained from the measuring part of the system was also created.

The proposed system is suitable for use by the relevant state services when controlling the mass and speed of ground vehicles, as it makes it possible to conduct a preliminary objective assessment of the total weight of the vehicle and to make a decision on the need to stop for further carrying out the standard weighing procedure. This will definitely contribute to increasing the reliability of preventing the movement of overloaded vehicles on the roads of Ukraine, and thereby increasing the period of safe operation of roads, as well as significantly reducing the losses of freight carriers and saving the time and efforts of controlling authorities due to the reduction of the number of unjustified cargo delays. It is also important that this system makes it possible to carry out a statistical study of the load of certain sections of highways for planning repair works and preventing the occurrence of dangerous situations on the roads.

Key words: *geophone, estimation of mass and speed, vehicle, waveforms, Raspberry Pi microcomputer.*

ОБРОБКА МАТЕРІАЛІВ У МАШИНОБУДУВАННІ

УДК 621.923.42

DOI <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2024.2/50>

Рудик А.В.

кандидат технічних наук, доцент

Рудик В.А.

Фірма ТАН

ВПЛИВ ПОХИБОК НАЛАДКИ ВЕРСТАТУ НА ПОХИБКИ ОБРОБКИ ПОВЕРХОНЬ ОБЕРТАННЯ

Точність машин визначає швидкохідність, енергетичну ефективність, матеріалосмність, надійність, довговічність та інші експлуатаційні показники. Точність суттєво впливає на собівартість виготовлення широко розповсюджених деталей машин, обмежених поверхнями обертання.

Якість обробки поверхонь визначається властивостями поверхневого шару. Фінішна обробка поверхонь обертання з сучасних матеріалів лезвійним інструментом часто ускладнена. Тому її здійснюють на фінішних операціях, зазвичай шліфуванням. Складові точності визначають проекцією на орт нормалі різниці між номінальною та реальною поверхнями. Подібним розрахунком визначена проекція швидкості відносної подачі на орт нормалі. Тому, визначені формоутворення, продуктивність, товщина зрізу, режими різання та інші показники. Це підкреслює універсальність та актуальність досліджень. Відома методика розрахунку точності обробки удосконалена. В якості прикладів розглянуті розрахунки показників точності обробки на токарному верстаті торців та поверхонь обертання. Використаний розрахунок матриці передатних коефіцієнтів двох стороннього торцево-шліфувального верстату. Верстат має продовжену функцію формоутворення та враховує розміри ланок. Врахований зв'язок між криволінійними координатами поверхні інструмента. Обчислення площі поверхні деталі виконано за допомогою якобіана. Складена матриця передатних коефіцієнтів впливу похибок положення верстатних ланок на технологічні.

Доведений вплив похибок положення верстатних ланок на технологічні на прикладах обробки поверхонь обертання для токарного та двох стороннього торцево-шліфувального верстату.

Доведена можливість взаємної корекції технологічних похибок на прикладі торцево-шліфувального верстату. Показники точності обробки на верстатах перевірені трьома розрахунковими методами та експериментально. Похибка знаходиться в межах 1,5 %.

Ключові слова: точність, шліфування, похибка, верстат, корекція.

Постановка проблеми. Точність машин – один з найважливіших показників якості, який суттєво впливає на швидкохідність, енергетичну ефективність, матеріалосмність, надійність та довговічність [1]. Точність визначає собівартість виготовлення деталей. Розвиток техніки пов'язаний із безперервним підвищенням вимог до точності машин.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Подібно до методики статті визначені продуктивність, формоутворення, режими різання [2].

Розрахунок показників точності був представлений на прикладі обробки торців двох сто-

роннього торцево-шліфувального верстату [3,4]. Задача досягнення потрібної точності вирішена лише частково, для одного типу верстату. Проблема може бути вирішеною для загального випадку та будь якого типу верстату.

Постановка завдання. 1. Удосконалити відому методику розрахунку точності. 2. Довести на прикладах токарного та торцево-шліфувального верстату обробку поверхонь обертання. Завдання – обґрунтувати вплив похибок положення ланок верстата та їх взаємну компенсацію на технологічні похибки.

Виклад основного матеріалу. Номінальну поверхню r_0 [1] характеризують ідеальним розташуванням верстатних ланок. Функція формоутворення (ФФ) токарного верстату описує спектр поверхонь, які можна обробити складена з добутку лише трьох матриць ($n=3$) перетворення СК r_0 :

$$r_0(x, z, \varphi) = A^6(\varphi) \cdot A^3(z) \cdot A^1(x) \cdot e^4 = (x \cdot \cos \varphi \quad x \cdot \sin \varphi \quad z; 1)^T,$$

Вектор $r_0(x, z, \varphi)$ залежить від змінних параметрів, два з яких z, φ рухомі, описують криволінійні координати, фіксована змінна X – визначає розмір.

Рухомі координати поверхні Z, φ , спрямовані вздовж та навколо осі Z обертання, z знаходиться в межах розміру L ; x – фіксоване переміщення різця визначає радіальний розмір деталі $x=R$, e^4 – біжуча точка, яка співпадає з вершиною. Через наявні похибки положення верстатних ланок, крім номінальної r_0 , розрізняють реальну, або базову, поверхню r_b , положення якої щодо номінальної r_0 характеризує технологічну похибку Δr_b , та може бути охарактеризованим різницею [6]:

$$\Delta \vec{r}_b = \vec{r}_b - \vec{r}_0. \quad (1)$$

Векторну похибку враховують сумою: розмірної похибки ; малих зсувів (або поворотів); та спотворенням форми:

$$\Delta \vec{r}_b = (\Delta \vec{r}_r + \Delta \vec{r}_e + \Delta \vec{r}_s)^-.$$

Для практики, рівняння (1) зручно записувати як технологічну похибку в проекції на орт нормалі, який визначають $|\vec{n}| = \left| \frac{\partial \vec{r}_0}{\partial z} \times \frac{\partial \vec{r}_0}{\partial \varphi} \cdot \frac{1}{|\vec{n}|} \right|$. Технологічну похибку, зручно описати скалярним добутком векторів:

$$\Delta r_b = Q \cdot \Delta n \quad (2)$$

Вектор Q складений з *шуканих* елементів q_i технологічної похибки. вектор Δn являє собою відомі проекції на орт нормалі n цих складових.

Довжину векторів p (2) визначають похибками розмірів r ; малих зсувів (поворотів) e ; можливого умовного спотворення форми s :

$$p = r + e + s \quad (3)$$

Кількість r розмірних похибок $r=n-m$, де n – кількість ланок формотворного коду ($n=3$), кількість $m=2$ – координат, які відтворюють *рухомі* ланки:

$$\Delta r_r = q_i \cdot \left[\frac{\partial \vec{r}_0}{\partial q_i} \cdot \vec{n} \right], \quad (4)$$

де q_i – елемент вектора Q , шукана похибка розміру, кількість *розмірних* похибок $r \geq (n-2)$.

Кількість малих зсувів (та поворотів) менше шести ($e \leq 6$) описують матрицею ξ_b , або сумою добутків невідомих похибок на $\delta q_i \cdot D_{i\sigma}$]:

$$\varepsilon_b = \begin{bmatrix} 0 & -\gamma_b & \beta_b & \delta_{xb} \\ \gamma_b & 0 & -\alpha_b & \delta_{yb} \\ -\beta_b & \alpha_b & 0 & \delta_{zb} \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} = \sum_{j=1}^n [\Delta q_{i\sigma} \cdot D_{i\sigma}^j]. \quad (5)$$

Кожну зі складових проекції на нормаль Δn зручно представити добутком нормалі часткової похідної до номінальної поверхні dr_0/dq_i на орт. $\Delta n_i = \frac{\partial \vec{r}_0}{\partial q_i} \cdot \vec{n}$ елементи похибок малих зсувів та поворотів отримують:

$$\Delta r_b = Q \cdot \Delta n = \sum_{i=1}^p \Delta q_i \cdot (D_i \cdot \vec{r}_0 \cdot \vec{n}). \quad (6)$$

Проекція технологічної похибки на орт нормалі повинна бути мінімальною, та складається з окремих доданків:

$$\Delta r_{e,i} = q_i \cdot (D_i \cdot \vec{r}_0 \cdot \vec{n}). \quad (7)$$

Визначають похибку спотвореної $\vec{\Delta r}_s = \vec{\Delta r}_0 + \delta \vec{r}_s$.

В найпростішому випадку, спотворення можна не враховувати $\Delta\beta=0$.

По елементах вектора Δn технологічних похибок визначають вагову матрицю H_{ij} взаємного впливу між елементами, розміром $p \times p$:

$$H_{ij} = \frac{1}{S} \int_S \Delta n_i \cdot \Delta n_j \cdot dS, \quad (8)$$

де площа поверхні деталі S , а dS її елемент.

Знаходять матрицю, обернену до вагової H^{-1} .

Вектор Δn може містити тригонометричні функції. Враховують, що лише інтеграл квадрата тригонометричної функції дорівнює π , решта дорівнює нулю:

$$\int_0^{2\pi} (\cos \varphi) d\varphi = \int_0^{2\pi} (\sin \varphi) d\varphi = \int_0^{2\pi} (\sin \varphi \cdot \cos \varphi) d\varphi = 0; \quad \int_0^{2\pi} (\cos^2 \varphi) d\varphi = \int_0^{2\pi} (\sin^2 \varphi) d\varphi = \pi.$$

Згідно функції формоутворення (ФФ), знаходять загальну похибку верстата у вигляді суми добутків окремих похибок положення ланок:

$$\Delta r_n = \sum_{i=0}^l \sum_{j=1}^6 \delta q_i^j \cdot [A_{0,i} \cdot \varepsilon_i \cdot A_{i,l} \vec{r}_l] \cdot \vec{n}, \quad (9)$$

де i – номер ланки ФФ, δq_i^j – шукана j -та похибка ε_{ij} i -ої ланки.

Вектор B похибок положення верстатних ланок, довжиною k , складають по елементах, де його i -ий елемент B_i :

$$B_i = \frac{1}{S} \int_S \Delta n_i \cdot \Delta r_n \cdot dS \quad (10)$$

Знаходять матрицю шуканих похибок:

$$Q = B \cdot H^{-1}, \quad (11)$$

Дисперсію σ^2 , між базовою та номінальною поверхнями визначають:

$$\sigma^2 = \frac{1}{S} \cdot \iint_S (\Delta r_n - [Q \cdot \Delta n])^2 \cdot dS; \quad (12)$$

де середньо квадратичне відхилення $\sigma = \sqrt{\sigma^2}$.

Елемент матриці передатних коефіцієнтів між k -ою вхідною верстатною похибкою положення ланки та l -ою технологічною., в межах розмірів оброблюваної поверхні, визначають:

$$W_{ik} = \frac{\frac{1}{S} \cdot \iint_S B_k \cdot \Delta n_i \cdot dS}{\frac{1}{S} \cdot \iint_S (\Delta n_i)^2 \cdot dS} = \left(\frac{1}{H_{ii}} \right) \cdot \frac{1}{S} \cdot \iint_S (B_k \cdot \Delta n_i) \cdot dS \quad (13)$$

Складена [1] діагностична таблиця впливу верстатних похибок на технологічні. Розглянемо приклади обробки окремих окремі поверхонь.

Точність обробки торця.

$$\text{Вектор номінальної поверхні торця } r_0(x, \varphi) = \begin{pmatrix} x \cdot \cos \varphi \\ x \cdot \sin \varphi \\ C \\ 1 \end{pmatrix},$$

де $C=z$ – розмір, що характеризує положення торця.

Вектор одиничної нормалі до торцевої поверхні $n_T = (0 \ 0 \ 1 \ 0)^T$.

Елемент площі та загальна площа торця $dS = x \cdot d\phi \cdot dx$, $S = \pi \cdot R^2$

Похибки положення торця (малі розміри δx , δy , γ_0) не враховують, бо їх проекція на нормаль n_T дорівнює нулю. Поверхня ковзає «сама по собі». Матриця технологічних похибок містить лише кутові розміри α_b, β_b кількість можливих зсувів (поворотів): та розмірну похибку Δc .

Шуканий вектор $Q = [\alpha_b \ \beta_b \ \Delta c]$.

Малі зсуви та повороти

$$\Delta r_{e1} = \alpha_b \cdot [D_4 \cdot \vec{r}_0 \cdot \vec{n}],$$

$$\Delta n_1 = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} x \cdot \cos \phi \\ x \cdot \sin \phi \\ c \\ 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \\ 0 \end{bmatrix} = x \cdot \sin \phi$$

$$\Delta r_{e2} = \beta_b \cdot [D_5 \cdot \vec{r}_0 \cdot \vec{n}],$$

$$\Delta n_2 = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ -1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} x \cdot \cos \phi \\ x \cdot \sin \phi \\ c \\ 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \\ 0 \end{bmatrix} = -x \cdot \cos \phi$$

Розмірна похибка $\Delta r_r = \frac{\partial \vec{r}_0}{\partial c} = \Delta c \cdot \left[\frac{\partial \vec{r}_0}{\partial c} \cdot \vec{n} \right] = \Delta c \cdot \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \\ 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \\ 0 \end{bmatrix} = \Delta c \cdot 1$, $\Delta n_3 = 1$

Вектор коефіцієнтів $\Delta n = [x \cdot \sin \phi \ -x \cdot \cos \phi \ 1]$.

Визначають матрицю H розміром 3×3 , враховуючи площу торцевої поверхні $S = \pi \cdot R^2$ її елемент, $dS = x \cdot dx \cdot d\phi$ та межі інтегрування $[0, R]$. $[0, 2\pi]$

$$H(R) = \frac{1}{\pi \cdot R^2} \cdot \int_0^{2\pi} \int_0^R \Delta n_{i,j} (d\phi \cdot x \cdot dx) = \frac{1}{\pi \cdot R^2} \cdot \begin{bmatrix} \frac{\pi \cdot R^4}{4} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{\pi \cdot R^4}{4} & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R^2/4 & 0 & 0 \\ 0 & R^2/4 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{\pi \cdot R^2} \end{bmatrix}$$

Зворотна матриця $H(R)^{-1} = \begin{bmatrix} 4/R^2 & 0 & 0 \\ 0 & 4/R^2 & 0 \\ 0 & 0 & \pi \cdot R^2 \end{bmatrix}$

Похибки положення ланок верстату утворюють баланс точності верстата Δr_n :

$$\Delta r_n(x, \phi) = (\xi_0 \cdot A^6 \cdot A^3 \cdot A^1 + A^6 \cdot \xi_1 \cdot A^3 \cdot A^1 + A^6 \cdot A^3 \cdot \xi_2 \cdot A^1 + A^6 \cdot A^3 \cdot A^1 \cdot \xi_3) \cdot \vec{n}_T$$

або $\Delta r_n(x, \phi) = x \cdot (\alpha_0 \cdot \cos \phi - \beta_0 \cdot \sin \phi + \beta_1 + \beta_2)$

Знаходимо елементи вектора B впливу верстатних на технологічні похибки. $B_i = \frac{1}{S} \int_S \Delta n_i \cdot \Delta r_n \cdot dS$.

Визначають вектор похибок $Q = B \cdot H^{-1}$,

$$\alpha_b = \frac{4}{R^2} \cdot \left[\frac{1}{\pi \cdot R^2} \cdot \int_0^{2\pi} \int_0^R (x \cdot \sin \phi) \cdot [x \cdot (\alpha_0 \cdot \cos \phi - \beta_0 \cdot \sin \phi + \beta_1 + \beta_2)] \cdot x \cdot dx \cdot d\phi \right] = -\beta_0$$

$$\beta_b = \frac{4}{R^2} \cdot \left[\frac{1}{\pi \cdot R^2} \cdot \int_0^{2\pi} \int_0^R (-x \cdot \cos \phi) \cdot [x \cdot (\alpha_0 \cdot \cos \phi - \beta_0 \cdot \sin \phi + \beta_1 + \beta_2)] \cdot x \cdot d\phi \cdot dx \right] = -\alpha_0$$

$$\Delta c = \pi \cdot R^2 \cdot \left[\frac{1}{\pi \cdot R^2} \cdot \int_0^{2\pi} \int_0^R (1 \cdot [x \cdot (\alpha_0 \cdot \cos \phi - \beta_0 \cdot \sin \phi + \beta_1 + \beta_2)]) \cdot x \cdot d\phi \cdot dx \right] = \frac{R}{3} \cdot (\beta_1 + \beta_2)$$

Отже, кутові технологічні похибки торцевої поверхні залежать лише від кутових похибок встановлення заготовки – нульової ланки. Ці похибки можуть з'явитися під час закріплення. Похибка відхилення від перпендикулярності $\sqrt{[\alpha_b^2 + \beta_b^2]}$. Визначають дисперсію $\sigma^2 = \frac{1}{S} \cdot \iint_S (\Delta r_n - \Delta q \cdot \Delta n)^2 dS$

$$\sigma^2 = \frac{1}{S} \cdot \iint_S \left([x \cdot (\alpha_0 \cdot \cos \phi - \beta_0 \cdot \sin \phi + \beta_1 + \beta_2)] - \left[-\beta_0 \cdot x \cdot \sin \phi + (\alpha_0 \cdot x \cdot \cos \phi) + \left(\frac{R}{3} \cdot (\beta_1 + \beta_2) \cdot 1 \right) \right] \right)^2 \cdot x \cdot d\phi \cdot dx$$

$$\sigma^2 = \frac{1}{\pi \cdot R^2} \cdot \int_0^{2\pi} \int_0^R \left(\frac{2 \cdot R}{3} \cdot (\beta_1 + \beta_2) \right)^2 \cdot x \cdot d\phi \cdot dx = \frac{4}{9} R^2 \cdot (\beta_1 + \beta_2)^2$$

Середньо квадратичне відхилення: $\sigma = \frac{2}{3} R \cdot (\beta_1 + \beta_2)$

де $\Delta q \cdot n \Delta$ – проекція на нормаль обумовлена наявністю похибок верстатних ланок; $S = \pi R^2$ – площа торцевої поверхні деталі, $dS = x \cdot d\phi \cdot dx$ – її елемент $\sigma = \sqrt{\sigma^2} = \frac{2}{3} R \cdot (\beta_1 + \beta_2)$

Наприклад, при спотворенні торця поверхнею з малим кутом $\pi/2 - \beta$, спрямованим перпендикулярно осі з обертання (рис. 1)

$$\vec{\delta r}_s = \frac{\vec{\delta r}_s}{\delta \beta} = \begin{bmatrix} x \\ 0 \\ x \cdot \text{tg} \beta \\ 0 \end{bmatrix} \text{ або } \Delta n_s = \frac{\vec{\delta r}_s}{\delta \beta} \cdot \vec{n} = \begin{bmatrix} x \\ 0 \\ x \cdot \text{tg} \beta \\ 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \\ 0 \end{bmatrix} \approx x \cdot \beta$$

Довжина вектора Δn збільшується до чотирьох елементів $Q = [\Delta c \quad \alpha_b \quad \beta_b \quad \beta_1]$. Відповідно збільшуються розміри матриці H

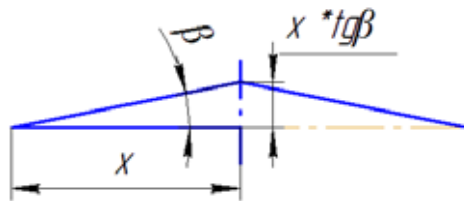


Рис. 1. Схема до розрахунку похибки торця

$$\Delta r_s = \Delta r_b + \delta r_c = \begin{bmatrix} x \cdot \cos \phi \\ x \cdot \sin \phi \\ c \\ 1 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} x \\ 0 \\ x \cdot \text{tg} \beta_1 \\ 0 \end{bmatrix},$$

$$\vec{n}^T \cdot \vec{\delta r}_s = x \cdot \text{tg} \beta_1 \approx x \cdot \beta_1$$

$$H = \begin{bmatrix} \frac{2}{R} & 0 & 0 & -\beta \\ 0 & \frac{R}{3} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{R}{3} & 0 \\ -\beta & 0 & 0 & \frac{3 \cdot \beta}{R} \end{bmatrix} \quad \text{Обернена матриця } H^{-1} = \begin{bmatrix} 2 \cdot R & 0 & 0 & -\frac{3}{\beta} \\ 0 & \frac{3}{R} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{3}{R} & 0 \\ -\frac{3}{\beta} & 0 & 0 & \frac{6}{R \cdot \beta^2} \end{bmatrix}$$

Визначають кут конуса β_1 .

Показаний вплив на технологічні похибки положення верстатних ланок. Знайдена дисперсія, спотвореної конусом форми. Визначають, яка з похибок є більшою. Слід враховувати зміну положення заготовки під час закріплення.

Вплив похибок на точність обробки циліндричної поверхні

$$\text{Вектор номінальної поверхні циліндричної ступені } \mathbf{r}_0 \quad r_0(z, \varphi) = \begin{pmatrix} R \cdot \cos \varphi \\ R \cdot \sin \varphi \\ z \\ 1 \end{pmatrix},$$

де $x=R$ – фіксоване радіальне переміщення, що визначає розмір деталі.

Елемент площі dS поверхні $dS = R \cdot d\varphi \cdot dz$. Орт нормалі $\mathbf{n}^T = [\cos \varphi \quad \sin \varphi \quad 0 \quad 0]$

Не враховують рухи спрямовані вздовж та навколо осі Z циліндричної поверхні $\delta_{zb}=0$ $\gamma_b=0$, кількість можливих малих переміщень $n=4$

Вектор малих зсувів, складений із добутоків нормалі та часткових похідних $\Delta \vec{r}_i = \Delta q_i \cdot \frac{\partial \vec{r}_0}{\partial q_i} = \Delta q_i \cdot [D_i \cdot \vec{r}_0 \cdot \vec{n}]$ по всіх зсувах, включно кутові похибки.

Для зсуву вздовж осі X отримують

$$\Delta r_{e1} = \delta_{xb} \cdot \Delta n_i = \delta_{xb} \cdot [D_1 \cdot \vec{r}_0 \cdot \vec{n}], \text{ або}$$

$$\Delta n_i = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} R \cdot \cos \varphi \\ R \cdot \sin \varphi \\ z \\ 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \cos \varphi \\ \sin \varphi \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} = \cos \varphi$$

$$\Delta r_{e2} = \delta_{yb} \cdot \Delta n_2 = \delta_{yb} \cdot [D_2 \cdot \vec{r}_0 \cdot \vec{n}], \text{ де}$$

$$\Delta n_2 = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} R \cdot \cos \varphi \\ R \cdot \sin \varphi \\ z \\ 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \cos \varphi \\ \sin \varphi \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} = \sin \varphi$$

$$\Delta r_{e3} = \alpha_b \cdot \Delta n_3 = \alpha_b \cdot [D_4 \cdot \vec{r}_0 \cdot \vec{n}], \text{ де}$$

$$\Delta n_3 = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} R \cdot \cos \varphi \\ R \cdot \sin \varphi \\ z \\ 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \cos \varphi \\ \sin \varphi \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} = -z \cdot \sin \varphi$$

$$\Delta r_{e4} = \beta_b \cdot [D_5 \cdot \vec{r}_0 \cdot \vec{n}], \partial e$$

$$\Delta n_4 = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ -1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} R \cdot \cos \phi \\ R \cdot \sin \phi \\ z \\ 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \cos \phi \\ \sin \phi \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} = z \cdot \cos \phi$$

Розмірний параметр циліндричної ступені ΔR ($r=n-2=1$):

$$\Delta r_r = \Delta R \cdot \left[\frac{\partial \vec{r}_0}{\partial R} \cdot \vec{n} \right] = \Delta R \cdot \begin{bmatrix} \cos \phi \\ \sin \phi \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \cos \phi \\ \sin \phi \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} = \Delta R \cdot 1, \quad \Delta n_5 = 1$$

Або разом $\Delta n = [\cos \phi \quad \sin \phi \quad -z \cdot \sin \phi \quad z \cdot \cos \phi \quad 1]$

Матриця ваги H розміром $(p * p)$ враховує зважений (методом найменших квадратів) вплив між технологічними похибками.

$$H = \frac{1}{2} \cdot \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & \frac{L}{2} & 0 \\ 0 & 1 & -\frac{L}{2} & 0 & 0 \\ 0 & -\frac{L}{2} & \frac{L^2}{2} & 0 & 0 \\ \frac{L}{2} & 0 & 0 & \frac{L^2}{2} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{2} \end{bmatrix}$$

$$\text{Обернена: } H^{-1} = 2 \cdot \begin{bmatrix} 2 & 0 & 0 & \frac{2}{L} & 0 \\ 0 & \frac{2}{3} & -\frac{2}{3 \cdot L} & 0 & 0 \\ 0 & -\frac{2}{3 \cdot L} & \frac{4}{3 \cdot L^2} & 0 & 0 \\ \frac{2}{L} & 0 & 0 & \frac{4}{L^2} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 4 & 0 & 0 & \frac{4}{L} & 0 \\ 0 & \frac{4}{3} & -\frac{4}{3 \cdot L} & 0 & 0 \\ 0 & -\frac{4}{3 \cdot L} & \frac{8}{3 \cdot L^2} & 0 & 0 \\ \frac{4}{L} & 0 & 0 & \frac{8}{L^2} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Шуканий вектор технологічних похибок $Q = [\delta_{xb}, \delta_{yb}, \alpha_b, \beta_b, \Delta R]^T$ положення базової поверхні визначають з рівняння: $Q = B \cdot H^{-1}$

Можливе спотворення, наприклад, конусністю ($s > 0$), не враховуємо.

Вектор B верстатних похибок, складений з урахуванням впливу похибок положення ланок. Проекцію Δr_n , для загального випадку токарного верстату визначають:

$$\Delta r_0(z, \phi) \cdot n = (\varepsilon_0 \cdot A^6 \cdot A^3 \cdot A^1 + A^6 \cdot \varepsilon_1 \cdot A^3 \cdot A^1 + A^6 \cdot A^3 \cdot \varepsilon_2 \cdot A^1 + A^6 \cdot A^3 \cdot A^1 \cdot \varepsilon_3 \cdot e^4) \cdot n,$$

Малі похибки положення заготовки – нульова ланка, перший доданок ξ_0 , відповідають зміні заготовки щодо осі центрів шпинделя, присутні під час її затискання: $\varepsilon_0 \cdot A^6 \cdot A^3 \cdot A^1 \cdot n = (\delta_{x0} \cdot \cos \phi + \delta_{y0} \cdot \sin \phi) + \beta_0 \cdot z$.

Другий доданок при ξ_1 відповідає зміні положення осі шпинделя відносно поперечного супорта. Третій доданок при ξ_2 відповідає малій похибці положення між супортами поперечним та поздовжнім.

$$A^6 \cdot \varepsilon_1 \cdot A^3 \cdot A^1 \cdot n = \delta_{x1} + \beta_1 \cdot z.$$

$$A^6 \cdot A^3 \cdot A^1 \cdot \varepsilon_2 \cdot n = \delta_{x_2} \cdot z + \beta_2 \cdot z.$$

Вектор Δr_n являє собою довгий ланцюг, котрий складається із окремих доданків, які враховують залежно від результату добутку множників.

$$\text{Після спрощень: } \Delta r_n = (\delta_{x_0} \cdot \cos \phi + \delta_{y_0} \cdot \sin \phi) + \sum_{i=1}^3 \delta_{xi} + z \cdot \sum_{i=0}^3 \beta_i.$$

Знаходять елементи вектора верстатних похибок $B_i = \int_S n \Delta_i \cdot \Delta r_n \cdot dS$,

$$B_1 = \frac{1}{2\pi RL} \cdot \int_0^{2\pi} \int_0^L \left(\cos \phi \cdot \left[(\delta_{x_0} \cdot \cos \phi + \delta_{y_0} \cdot \sin \phi) + \sum_{i=1}^3 \delta_{xi} + z \cdot \sum_{i=0}^3 \beta_i \right] \right) \cdot R \cdot dz \cdot d\phi = \frac{\delta_{x_0}}{2}$$

$$B_2 = \frac{1}{2\pi RL} \cdot \int_0^{2\pi} \int_0^L \left(\sin \phi \cdot \left[(\delta_{x_0} \cdot \cos \phi + \delta_{y_0} \cdot \sin \phi) + \sum_{i=1}^3 \delta_{xi} + z \cdot \sum_{i=0}^3 \beta_i \right] \right) \cdot R \cdot dz \cdot d\phi = \frac{\delta_{y_0}}{2}$$

$$B_3 = \frac{1}{2\pi RL} \cdot \int_0^{2\pi} \int_0^L \left(-z \cdot \sin \phi \cdot \left[(\delta_{x_0} \cdot \cos \phi + \delta_{y_0} \cdot \sin \phi) + \sum_{i=1}^3 \delta_{xi} + z \cdot \sum_{i=0}^3 \beta_i \right] \right) \cdot R \cdot dz \cdot d\phi = \frac{-L \cdot \delta_{y_0}}{4}$$

$$B_4 = \frac{1}{2\pi RL} \cdot \int_0^{2\pi} \int_0^L \left(z \cdot \cos \phi \cdot \left[(\delta_{x_0} \cdot \cos \phi + \delta_{y_0} \cdot \sin \phi) + \sum_{i=1}^3 \delta_{xi} + z \cdot \sum_{i=0}^3 \beta_i \right] \right) \cdot R \cdot dz \cdot d\phi = \frac{L \cdot \delta_{x_0}}{4}$$

$$B_5 = \frac{1}{2\pi RL} \cdot \int_0^{2\pi} \int_0^L \left(1 \cdot \left[(\delta_{x_0} \cdot \cos \phi + \delta_{y_0} \cdot \sin \phi) + \sum_{i=1}^3 \delta_{xi} + z \cdot \sum_{i=0}^3 \beta_i \right] \right) \cdot R \cdot dz \cdot d\phi = \frac{\sum_{i=1}^3 \delta_{xi}}{2\pi} + \frac{L}{4\pi} \cdot \sum_{i=0}^3 \beta_i$$

Згідно $Q = B \cdot H^{-1}$, визначають шукані елементи вектора технологічних похибок $Q = [\delta_{xb}, \delta_{yb}, \alpha_b, \beta_b, \Delta R]$ Т положення базової поверхні залежно від похибок ланок:

$$\delta_{xb} = \left(4 \cdot B_1 + \frac{4}{L} \cdot B_4 \right) = \frac{\delta_{x_0}}{4} \cdot 4 + \frac{L \cdot \delta_{x_0}}{4} \cdot \frac{4}{L} = 2 \cdot \delta_{x_0}$$

$$\delta_{yb} = \left(\frac{2}{3} \cdot B_2 - \frac{2}{3L} \cdot B_3 \right) = \frac{2}{3} \cdot \delta_{y_0} - \frac{L}{4} \cdot \frac{4}{3L} \cdot \delta_{y_0} = \frac{1}{3} \cdot \delta_{y_0}$$

Технологічні похибки, які визначають биття заготовки, можуть бути усуненими лише її зсувом вздовж відповідних осей.

$$\alpha_b = \left(-\frac{4}{3L} \cdot B_2 + \frac{8}{3L^2} \cdot B_3 \right) = -\frac{4}{3L} \cdot \frac{\delta_{y_0}}{2} - \frac{8}{3L^2} \cdot \frac{L \cdot \delta_{y_0}}{4} = -\frac{4}{3} \cdot \frac{\delta_{y_0}}{L}$$

$$\beta_b = \left(\frac{4}{L} \cdot B_1 + \frac{8}{L^2} \cdot B_4 \right) = \frac{4}{L} \cdot \frac{\delta_{x_0}}{2} + \frac{8}{L^2} \cdot \frac{L}{4} \cdot \delta_{x_0} = 4 \cdot \frac{\delta_{x_0}}{L}$$

Загальна кутова похибка $\varepsilon_b = \sqrt{\alpha_b^2 + \beta_b^2}$

Похибка розміру $\Delta R = B_5 = \frac{1}{2\pi} \cdot \left(\sum_{i=1}^3 \delta_{xi} + L \cdot \sum_{i=0}^3 \beta_i \right)$.

Дисперсія щодо номінального положення: $\sigma^2 = \frac{1}{S} \cdot \iint_S (\Delta r_n - \Delta q \cdot N \Delta)^2 dS$

де $\Delta r_n - \Delta q \cdot N \Delta$ – сумарна похибка положення верстатних ланок.

$$\sigma^2 = \frac{1}{S} \cdot \iint_S \left(\left[(\delta_{x_0} \cdot \cos \phi + \delta_{y_0} \cdot \sin \phi) + \sum_{i=1}^3 \delta_{xi} + z \cdot \sum_{i=0}^3 \beta_i \right] - 2(\delta_{x_0} \cdot \cos \phi + \delta_{y_0} \cdot \sin \phi) - \left[-0 - \sum_{i=1}^3 \delta_{xi} + \frac{L}{2} \cdot \sum_{i=0}^3 \beta_i \right] \right)^2 \cdot R \cdot dz \cdot d\phi$$

Доведений вплив положення ланок на окремі складові точності. Досягнення потрібної точності можна досягти за рахунок аналізу діагностичних сигналів технологічних похибок [1].

Найбільший практичний інтерес для розрахунку представляють похибки ланок, які дозволяють усувати їх вплив. Слід враховувати вплив силового навантаження. Можливе спотворення конусністю циліндричної ділянки характеризують кутом β .

Точність шліфування торців при компенсації кутів орієнтації кругів верстата моделі 3342 АДО

Фінішну обробку відповідальних поверхонь здійснюють шліфуванням. До торцевого шліфування надають жорсткі вимоги як до точності обробки, так і високої продуктивності. А саме, для торців твердосплавних пластин важливими є вимоги щодо паралельного положення торців до базової площини. Задачу вирішують орієнтацією шліфувальних бабок у горизонтальній γ та вертикальній ν площинах. Це верстатні похибки В, які створюють технологічну похибку обробки торців Т.

Зменшення впливу похибок положення ланок та їх можлива взаємна корекція дозволить зменшити загальну помилку обробки.

Отже, питання взаємної корекції [3,4] наявних верстатних похибок є актуальною задачею. Додатковими складностями проблеми забезпечення потрібної точності є питання втрати форми абразивного інструменту, що викликані зношенням. Абразивний інструмент потребує правку.

До верстатних похибок відносять сукупність В малих кутових чи лінійних відхилень положення або розмірів ланок від номінального значення. Відхилення обумовлені якістю складання, зазорами у спряженнях, зміною розмірів за рахунок теплових або силових деформацій. Вказані похибки завжди присутні.

Елемент матриці W між k -ою вхідною (похибка положення ланки верстату) та i -ою вихідною технологічною похибками наведений вище (13).

$$W_{ik} = \frac{\frac{1}{S} \cdot \iint_S B_k \cdot \Delta n_i \cdot dS}{\frac{1}{S} \cdot \iint_S (\Delta n_i)^2 \cdot dS} = \left(\frac{1}{H_{ii}} \right) \cdot \frac{1}{S} \cdot \iint_S (B_k \cdot \Delta n_i) \cdot dS$$

Елементарні площинки відіграють роль вагової функції по усередненню впливу у межах площі обробленої поверхні. Але, криволінійні координати інструмента за допомогою якобіана слід привести до полярних.

Результати роботи [4] дозволили врахувати положення лінії контакту за рахунок зміни профілю зношеного інструмента. Тут β , ρ – криволінійні координати, описують рухи подачі, та положення лінії контакту $\beta(\rho)$.

Перевагами вибору верстату та заготовки є наступне.

– Верстат використовують на фінішних операціях двох стороннього шліфування торців, має клас точності А, характеризується високою продуктивністю, Форму інструмента отримують в процесі правки, а далі здійснюють кінцеве формоутворення поверхонь торців.

Найбільш проста кругла форма перетину поверхні, площею $S = \iint dS$, або $S = \pi \cdot r^2$ де r – радіус деталі ($r=10$).

Торцеву поверхню деталі повинна характеризуватись мінімальним кутовим відхиленням Λ від перпендикулярності торця. Одиничний вектор нормалі до номінальної поверхні торця деталі (орт) при обраному положенні систем координат спрямований вздовж осі Z: $\vec{n} = [0 \ 0 \ 1 \ 0]^T$.

У якості вектора верстатних похибок використовують лише кути орієнтації шліфувальних бабок у вертикальній ν та горизонтальній γ площинах з метою ефективної обробки, коли їх співвідношенням досягають потрібну точність. Тобто вектор похибок містить лише елементи $B = [\nu \ \gamma]^T$.

Технологічні похибки Δn номінального розташування торця заготовки поділяють на малі лінійні та кутові зміщення щодо номінального розташування, як і будь-якої іншої ланки. Для цього знаходять [3]:

$$\Delta \vec{r}_0(\beta, \rho) \approx \varepsilon_b \cdot \vec{r}_0(\beta, \rho), \quad (14)$$

де $r_0(\beta, \rho)$ – радіус-вектор номінальної поверхні [3,4]; ε_b – загальна матриця похибок ланки, враховує невідомі малі зсуви та кути відносно номінальної СК. Для торця елементи δ_{xb} , δ_{yb} та γ_b загальної матриці

ε_b не враховують, їх проекція на нормаль дорівнює нулю, вони призводять лише до ковзання площини «самій по собі».

Рівняння векторної похибки базової поверхні щодо номінального розташування торця можна подати у вигляді

$$\Delta \vec{r}_b(\beta, \rho) = \varepsilon_b^* \cdot \vec{r}_b(\beta, \rho) = \{\delta_{bz} \cdot D^3 + \alpha_b \cdot D^4 + \beta_b \cdot D^5\} \cdot \vec{r}_b(\beta, \nu), \quad (15)$$

де D^1, \dots, D^6 – матриці похибок окремих складових переміщень відносно осей координат [1,4]. Вектор Δn технологічних похибок можна представити:

$$\Delta n = [\delta_{bz} \quad \alpha_b \quad \beta_b]^T \quad (16)$$

Тут розмірну похибку δ_{bz} , відкореговують переміщенням пінолі.

Задача підвищення точності шліфування плоских поверхонь була аналітично вирішена трьома методами [3,4]:

- А) рішенням векторних рівнянь поверхні круга та сімейства твірних;
- В) варіаційним методом [3,4];
- С) за допомогою матриць передатних коефіцієнтів [4].

Кут ν орієнтації шліфувальних бабок у вертикальній площині, необхідний для підвищення продуктивності, коли торцеву поверхню інструмента включають у процес зняття припуску.

Оптимальне співвідношення кутів орієнтації шліфувальних бабок (метод А) знаходили по кроках за часом обробки, сумісно вирішуючи векторні рівняння сімейства твірних ліній заготовки з поверхнею інструмента. Порівняння проводили по координаті, яка відповідає осьовому напрямку. Кращим вважали співвідношення кутів, коли різниця координат приймала мінімального значення.

Виявилося, що на похибку більше впливає (орієнтовно в 1,57 рази) кут орієнтації ν у вертикальній площині. Кути впливають з різним знаком, тому можуть бути взаємно відкоригованими.

Варіацію вектору верстатних B похибок [3,4] (метод В) знаходять по результатах розрахунків та вимірювання. Для продуктивного зняття припуску попередньо вибирають раціональне значення кута ν . Далі через раціональне співвідношення γ/ν здійснить попередній вибір кута орієнтації γ_0 у горизонтальній площині. Потім проводять його корегування $\Delta\gamma$ з метою покращення точності, визначають корегований кут $\gamma_0 + \Delta\gamma = \gamma_k$.

Вектор верстатних B похибок наладки у якості елементів має: кутове корегування орієнтації $\Delta\gamma$ шліфувальних бабок і розмір Δz осьового положення їх пінолей $\delta = [\Delta\gamma \quad \Delta z]^T$.

З профілограми через рівні кути, для периферійних точок складають вектор довжиною p (де $p \leq k=12$) з похибок Δ , вимірних в напрямку нормалі. Елементи матриці M розміром $p \times 2$, викликані орієнтацією бабок в точці заготовки з параметрами β, ρ визначають, проекцією варіації векторної похибки на напрям нормалі [3]:

$$M = [\vec{V}_\gamma \quad \vec{V}_z] \cdot \vec{n}. \quad (17)$$

Вирішують рівняння $M \cdot \delta = \Delta$, звідки знаходять шукані похибки наладки γ_0 :

$$\delta = (M^T \cdot M)^{-1} \cdot M^T \cdot \Delta. \quad (18)$$

Для початкових значень кутів $\nu = 1/400$ $\gamma_0 = 1,37 \cdot \nu$, отримали значення похибки наладки $\delta = \begin{bmatrix} \Delta z \\ \Delta \gamma \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0,001 \\ -0,098 \end{bmatrix}$.

Знаходять значення корекції кута $\Delta\gamma$ для заданих значень кутів ν, γ_0 за рівнянням визначають оптимальне співвідношення кутів орієнтації шліфувальних бабок $\gamma/\nu = 1,57$ (рис. 2):

$$\frac{\gamma_k}{\nu} = \frac{\gamma_0 + \Delta\gamma}{\nu} \approx 1,58 \quad (19)$$

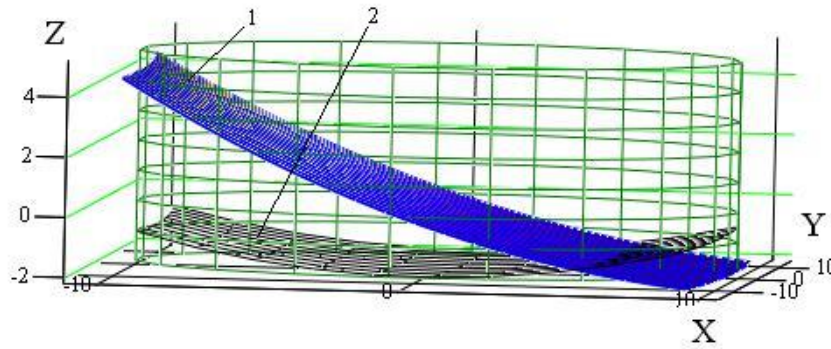


Рис. 2. Початкове положення торця 1 для кута γ_0 та корекція γ_k торця 2

Отримані профілограми початкового положення торця та відкоригованої поверхні (рис. 2), похибки якої не перебільшили значення 2 мкм для широкого діапазону зміни відношення кутів γ/ν .

У роботі [4] задачу вирішено із використанням матриці передатних коефіцієнтів (метод С):

$$W_{i,k} = \frac{\int_{\theta_1}^{\theta_2} \int_{\theta_{b1}}^{\theta_{b2}} ja \cdot B_i \cdot (N\Delta_k) \partial\theta_b \cdot \partial\theta}{\int_{\theta_1}^{\theta_2} \int_{\theta_{b1}}^{\theta_{b2}} ja \cdot (N\Delta_k)^2 \partial\theta_b \cdot \partial\theta}$$

Деякою складністю розрахунку є необхідність застосовувати якобіан перетворення декартових координат в криволінійні:

$$Ja = \frac{\partial B}{\partial \theta} \cdot \frac{\partial B}{\partial \theta} - \frac{\partial B}{\partial \theta} \cdot \frac{\partial B}{\partial \theta}$$

$$\frac{\partial B}{\partial \theta} = D5 \cdot \frac{\partial \vec{r}_0(\theta_b, \theta)}{\partial \theta}; \quad \frac{\partial \Delta n}{\partial \theta_b} = \frac{r_{01}(\beta) \cdot A^4(-\gamma) \cdot D5 \cdot A^5(-\nu) \cdot r_{02}(\theta(\rho)) \cdot e^{-4}}{\partial \theta};$$

$$\frac{\partial B}{\partial \theta} = D4 \cdot \frac{\partial \vec{r}_0(\theta_b, \theta)}{\partial \theta}; \quad \frac{\partial \Delta n}{\partial \theta_b} = \frac{r_{01}(\beta) \cdot D4 \cdot A^4(-\gamma) \cdot A^5(-\nu) \cdot r_{02}(\theta(\rho)) \cdot e^{-4}}{\partial \theta}$$

Вплив верстатних похибок (кути орієнтації бабок) на технологічні, які характеризують відхилення від перпендикулярності торця, має вигляд $B=W*\Delta n$:

$$\begin{bmatrix} \alpha_b \\ \beta_b \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} w_{\alpha\nu} & w_{\alpha\gamma} \\ w_{\beta\nu} & w_{\beta\gamma} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \nu \\ \gamma \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} w_{\alpha\nu} & w_{\alpha\gamma} \\ w_{\beta\nu} & w_{\beta\gamma} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 1 \\ \gamma/\nu \end{bmatrix} \cdot \nu. \quad (20)$$

Отримали матрицю передатних коефіцієнтів $W = \begin{bmatrix} -0,002 & -0,0014 \\ -0,915 & 0,583 \end{bmatrix}$,

Крім похибок від перпендикулярності положення обробленого торця, які оцінюють кутом $\sqrt{\alpha_b^2 + \beta_b^2}$, математична модель дозволяє визначити міру розсіювання навколо базової площини через дисперсію σ^2 :

$$\sigma^2 = \frac{1}{S} \cdot \iint_s [\Delta r_n(\beta, \rho) - \Delta r_{b,n}(\beta, \rho)]^2 dS, \quad (21)$$

де проекцію $\Delta r_n(\beta, \rho)$ вихідної похибки на нормаль для вимірних точок та $\Delta r_{b,n}(\beta, \rho)$ для базової площини, визначають у точці торця.

1. Елемент матриці $W_{\alpha\nu}$ та $W_{\beta\nu}$, показує, наскільки сильно впливає кут орієнтації ν шліфувальної бабки (або γ) на значення кутової похибки базової площини α_b . Загальний вплив кута ν на зміну кутів α_b, β_b , тобто на відхилення від перпендикулярності торця, оцінюють як $\sqrt{W_{\alpha\nu}^2 + W_{\beta\nu}^2}$.

2. Вплив кутів орієнтації γ, ν шліфувальних бабок на вихідні похибки протилежний, тому зміну значення одного з цих кутів можна частково компенсувати іншим.

3. Елементи матриці передатних коефіцієнтів дозволяють визначити співвідношення, коли похибка формоутворення приймає мінімальне значення. Сума квадратів вихідних похибок, яка визначає результуючу при орієнтації, повинна бути мінімальною $\alpha^2_b + \beta^2_b \rightarrow \min$.

Сумарну кутову похибку формоутворення торця визначають з рівняння:

$$\Lambda(\gamma, \nu)^2 = [w_{\alpha\nu} \cdot \nu + w_{\alpha\gamma} \cdot \gamma]^2 + [w_{\beta\nu} \cdot \nu + w_{\beta\gamma} \cdot \gamma]^2 \rightarrow \min . \quad (22)$$

Знайшовши та зробивши похідну нулеві, отримують оптимальне співвідношення кутів орієнтації шліфувальних бабок, яке забезпечує найкращу точність формоутворення торців [4]:

$$\frac{\gamma}{\nu} = -\frac{w_{\alpha\nu} \cdot w_{\alpha\gamma} + w_{\beta\nu} \cdot w_{\beta\gamma}}{(w_{\alpha\gamma})^2 + (w_{\beta\gamma})^2} = 1,57. \quad (23)$$

Графік функції представлений на рис. 3. Результати добре співвідносяться з [3] та можуть бути використаними для діагностики роботи.

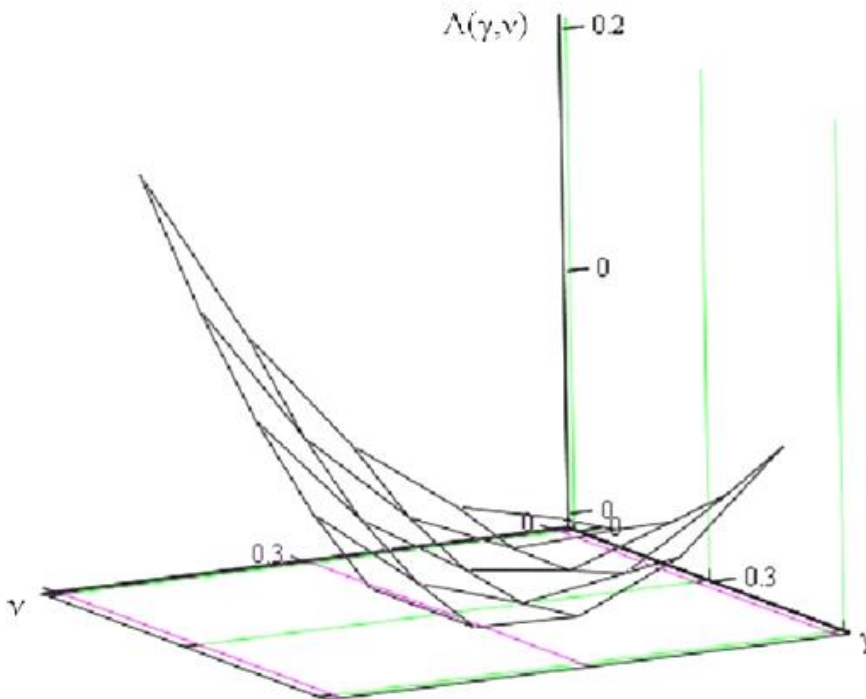


Рис. 3. Співвідношення між кутами орієнтації шліфувальної бабки, що визначає мінімальну похибку формоутворення

Висновки.

1. Переверено декілька методів, а саме: А) рішення векторних рівнянь поверхні круга із сімейством твірних, В) варіацію функції формоутворення та С) знаходження матриці передатних коефіцієнтів. Похибка розрахунків по різних методиках знаходиться в межах 1,5%.

2. Кожен із методів має свої переваги. У якості обмежень виступають діапазони зміни кутів γ, ν ,

обумовлений граничними значеннями припуску та, максимальної продуктивності. Варіація функції формоутворення має відносно просту визначення та дозволяє врахувати дисперсію обробленої поверхні, а метод передатних коефіцієнтів дає можливість розрахунку сили впливу спряжень між ланками на окремі елементи технологічної похибки.

3. Експериментальні дослідження відповідають розрахунковим.

Список літератури:

1. What Is The Accuracy Of A CNC Machine, And How Is It Calculated?/ URL: <https://yijinsolution.com/news-blog/what-is-the-accuracy-of-a-cnc-machine/>
2. Рудик А.В., Рудик В.А. Вибір режимів ефективного шліфування валів при керуванні міжосьовою відстанню верстата. *Вісник Національного технічного університету «ХПІ»*. Харків: НТУ «ХПІ». 2022. № 2 (12). С. 25-32. doi:10.20998/2413-4295.2022.02.04.
3. Рудик А.В., Венжега В.І. Формоутворення торців деталей автомобілів при двосторонньому шліфуванні. *Вісник ЧДТУ: Збірник*. Чернігів: ЧДТУ, 2008. Вип.34. С. 80–88.
4. A.V. Rudyk, V. M. Chupryna, V.A. Rudyk. Effect of shape formation on the accuracy of grinding ends while compensating for machine tool errors/ *EEJET*, № 2/1 (110)2021, p. 90-97. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2021.226479>.

Rudyk A.V., Rudyk V.A. INFLUENCE OF MACHINE SETTING ERRORS ON ERRORS IN THE PROCESSING OF ROTATING SURFACES

Machine accuracy determines speed, energy efficiency, material capacity, reliability, durability and other performance indicators. Accuracy significantly affects the cost of production. of widespread machine parts limited by surfaces of rotation. The quality of surface treatment is determined by the properties of the surface layer. Finishing of turning surfaces from modern materials with a blade tool is often complicated. Therefore, it is carried out during finishing operations, usually by grinding. The accuracy components are determined by the projection of the difference between the nominal and real surfaces on the orth normal. The projection of the relative feed speed on the orth normal is determined by a similar calculation. Therefore, shaping, productivity, slice thickness, cutting modes and other parameters are defined. This emphasizes the universality and relevance of research. The well-known method of calculating the accuracy of processing has been improved. As examples, the calculations of the accuracy indicators of the lathe of the ends and surfaces of rotation are considered. The calculation of the matrix of transmission coefficients of the two-sided face-grinding machine is used. The machine has an extended forming function and takes into account the dimensions of the links. The relationship between the curvilinear coordinates of the tool surface is taken into account. The calculation of the surface area of the part is performed using the Jacobian. Composite matrix of transfer coefficients of influence of position errors of machine parts on technological ones. The influence of errors in the position of the machine parts on the processing of turning surfaces for a lathe and a two-sided face-grinding machine is proven. The possibility of mutual correction of technological errors using the example of an end-grinding machine is proven. The indicators of the accuracy of processing on the machines were verified by three calculation methods and experimentally. The error is within 1.5%.

Key words: precision, grinding, error, machine, correction.

Відомості про авторів

Абрамова А.О. – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри технічних та програмних засобів автоматизації Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Арінушкіна Н.С. – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри будівництва та експлуатації автомобільних доріг Харківського національного автомобільно-дорожнього університету

Афанасьєв Б.О. – студент кафедри комп'ютерних систем і мереж Івано-Франківського національного технічного університету нафти і газу

Батюк С.Г. – кандидат технічних наук, доцент кафедри автоматизації енергетичних процесів Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Бейрак Д.Я. – аспірант кафедри інженерії програмного забезпечення Державного університету «Житомирська політехніка»

Бердниченко Є.О. – аспірант Державного університету інфраструктури та технологій

Бердниченко Ю.А. – кандидат історичних наук, доцент, доцент кафедри технологій транспорту та управління процесами перевезень Державного університету інфраструктури та технологій

Беляков Р.О. – кандидат технічних наук, доцент, докторант науково-організаційного відділу Військового інституту телекомунікацій та інформатизації імені Героїв Крут

Биковець Н.П. – кандидат технічних наук, доцент, завідувачка кафедри управління в транспортній галузі Дунайського інституту Національного університету «Одеська морська академія»

Бондаренко Ю.А. – здобувач ступеня доктора філософії кафедри «Експлуатація флоту і технологія морських перевезень» Одеського національного морського університету

Бугаєва Л.М. – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри технічних та програмних засобів автоматизації Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Бутовський Л.С. – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри теплової та альтернативної енергетики Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Вакалюк Т.А. – доктор педагогічних наук, професор, завідувач кафедри інженерії програмного забезпечення Державного університету «Житомирська політехніка»

Василенко В.М. – кандидат технічних наук, доцент, завідувач кафедри комп'ютерних технологій дизайну і графіки факультету наземних споруд і аеродромів Національного авіаційного університету

Васянович В.М. – бакалаврант 4 курсу кафедри автоматизації енергетичних процесів Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Верпівський С.М. – заступник начальника кафедри, Військова академія (м. Одеса)

Вінюков-Прощенко А.С. – кандидат економічних наук, доцент кафедри організації авіаційних перевезень Національного авіаційного університету

Витяганець В.С. – аспірант кафедри хімічної техніки та промислової екології Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут»

Ворошилов А.І. – магістрант 1 курсу кафедри автоматизації енергетичних процесів Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Гладка О.М. – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри комп'ютерних технологій та економічної кібернетики Національного університету водного господарства та природокористування

Глуховський В.В. – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри хімічної технології композиційних матеріалів Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Глуховський І.В. – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри хімічної технології композиційних матеріалів Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Голуб Т.В. – кандидат технічних наук, доцент кафедри комп'ютерних систем та мереж Національного університету «Запорізька політехніка»

Гондовська А.С. – аспірант 2 курсу групи ЛЦ-21ф кафедри екології та технології рослинних полімерів Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Гончаров Д.С. – аспірант кафедри комп'ютерної інженерії Чорноморського національного університету імені Петра Могили

Гончарова Н.В. – аспірант кафедри інженерії програмного забезпечення Чорноморського національного університету імені Петра Могили

Горюк М.С. – кандидат технічних наук, Фізико-технологічний інститут металів та сплавів Національної академії наук України

Грищенко Т.М. – старший викладач кафедри будівництва та експлуатації автомобільних доріг Харківського національного автомобільно-дорожнього університету

Гузь А.М. – старший викладач кафедри безпеки життєдіяльності та професійно-прикладної фізичної підготовки Херсонської державної морської академії

Гуйда О.Г. – кандидат наук з державного управління, доцент, завідувач кафедри комп'ютерних та інформаційних технологій Таврійського національного університету імені В.І. Вернадського

Гуменюк Т.С. – студент 4 курсу групи ПБ-02 кафедри комп'ютерно-інтегрованих технологій виробництва приладів Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Демидюков О.В. – аспірант кафедри «Експлуатація портів і технологія вантажних робіт» Одеського національного морського університету

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

Домашенко Д.Г. – магістрант кафедри комп'ютерних наук Запорізького національного університету

Домашенко С.В. – кандидат фізико-математичних наук, доцент, доцент кафедри інформаційних технологій в туризмі Національного університету «Запорізька політехніка»

Доросевич В.С. – магістрант Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Дьячук Т.С. – старший викладач кафедри комп'ютерних систем та мереж Національного університету «Запорізька політехніка»

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

Єфімова В.Г. – кандидат технічних наук, доцент кафедри фізичної хімії Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Жданова Ю.Д. – кандидат фізико-математичних наук, доцент, доцент кафедри інформаційної та кібернетичної безпеки імені професора Володимира Бурячка Київського столичного університету імені Бориса Грінченка

Іваненко І.М. – кандидат хімічних наук, доцент, кафедра технології неорганічних речовин, водоочищення та загальних хімічних технологій Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Кандиба І.О. – доктор філософії, старший викладач кафедри інженерії програмного забезпечення Чорноморського національного університету імені Петра Могили

Карпенко М.І. – аспірант кафедри автоматизації та комп'ютерних технологій систем управління Національного університету харчових технологій

Карпович І.М. – кандидат фізико-математичних наук, доцент, доцент кафедри комп'ютерних технологій та економічної кібернетики Національного університету водного господарства та природокористування

Карпунін Є.О. – аспірант Фізико-технологічного інституту металів та сплавів Національної академії наук України

Карягін Г.Є. – Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Кириченко Г.І. – доктор технічних наук, професор, професор кафедри технологій транспорту та управління процесами перевезень Державного університету інфраструктури та технологій

Ківа І.Л. – кандидат технічних наук, доцент, старший викладач кафедри комп'ютерних та інформаційних технологій Таврійського національного університету імені В.І. Вернадського

- Кішянус І.В.** – старший викладач, Військова академія (м. Одеса)
- Корнєв В.П.** – Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»
- Косей М.П.** – аспірант кафедри комп'ютерних систем та мереж комп'ютерних систем та мереж Криворізького національного університету
- Крамаренко Д.П.** – магістр кафедри технічних та програмних засобів автоматизації Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»
- Кузьменко В.С.** – асистент кафедри безпеки життєдіяльності та професійно-прикладної фізичної підготовки Херсонської державної морської академії
- Кузьменко О.Ю.** – старший викладач кафедри економіки та морського права Херсонської державної морської академії
- Купін А.І.** – доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри комп'ютерних систем та мереж комп'ютерних систем та мереж Криворізького національного університету
- Кучма О.С.** – аспірант кафедри організації авіаційних перевезень Національного авіаційного університету
- Лесік С.М.** – аспірант кафедри технології неорганічних речовин, водоочищення та загальних хімічних технологій Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»
- Лисенко О.І.** – доктор технічних наук, професор, професор кафедри телекомунікацій Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»
- Лисий О.В.** – кандидат технічних наук, доцент, начальник кафедри, Військова академія (м. Одеса)
- Лісовець С.М.** – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри інженерних систем та технологій Таврійського національного університету імені В.І. Вернадського
- Лігачевський В.В.** – аспірант кафедри експлуатації портів і технології вантажних робіт Одеського національного морського університету
- Ловська А.О.** – доктор технічних наук, професор, професор кафедри інженерії вагонів та якості продукції Українського державного університету залізничного транспорту
- Лук'янченко О.Ю.** – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри автомобілів та технологій їх експлуатації Черкаського державного технологічного університету
- Малиновський О.А.** – старший викладач кафедри, Військова академія (м. Одеса)
- Мар'янський М.О.** – бакалаврант 4 курсу кафедри автоматизації енергетичних процесів Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»
- Мастенко І.В.** – аспірант кафедри комп'ютерно-інтегрованих технологій виробництва приладів Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»
- Мацюк К.В.** – студентка кафедри технології неорганічних речовин, водоочищення та загальної хімічної технології Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»
- Михайленко Н.В.** – магістр 2 курсу групи ЛЦ-21мн кафедри екології та технології рослинних полімерів, інженерно-хімічного факультету Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»
- Мінаєва Ю.Ю.** – старший викладач кафедри загальноінженерних дисципліна та теплоенергетики Таврійського національного університету імені В.І. Вернадського
- Мурад'ян А.О.** – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри «Експлуатація портів і технологія вантажних робіт» Одеського національного морського університету
- Нікішин В.А.** – викладач кафедри, Військова академія (м. Одеса)
- Обушенко Т.І.** – старший викладач кафедри технології неорганічних речовин, водоочищення та загальної хімічної технології Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»
- Олещенко Л.М.** – кандидат технічних наук, доцент кафедри програмного забезпечення комп'ютерних систем Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Павлюченков М.В. – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри будівельних конструкцій Сумського національного аграрного університету

Пашковський Б.В. – кандидат технічних наук, доцент кафедри комп'ютерних систем і мереж Івано-Франківського національного технічного університету нафти і газу

Петренко Д.В. – аспірант кафедри автоматизації та систем неруйнівного контролю Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Петров Л.М. – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри, Військова академія (м. Одеса)

Петрук О.О. – здобувач освіти за спеціальністю «Інженерія програмного забезпечення» Державного університету «Житомирська політехніка»

Пилипенко В.О. – студент 4 курсу групи ПБ-01 кафедри комп'ютерно-інтегрованих технологій виробництва приладів Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Підгорний М.В. – кандидат технічних наук, доцент, професор кафедри комп'ютерних наук та системного аналізу Черкаського державного технологічного університету

Пітак І.В. – кандидат технічних наук, доцент кафедри хімічної техніки та промислової екології Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут»

Потоскаєв О.М. – аспірант Полтавського державного аграрного університету

Протасов А.Г. – доктор педагогічних наук, кандидат технічних наук, професор, професор кафедри автоматизації та систем неруйнівного контролю Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Риндюк Д.В. – кандидат технічних наук, доцент кафедри теплової та альтернативної енергетики Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Рувінська В.М. – кандидат технічних наук, професор, професор кафедри інженерії програмного забезпечення Національного університету «Одеська політехніка»

Рудик А.В. – кандидат технічних наук, доцент

Рудик В.А. – молодший науковий співробітник, робітник фірми ТАН

Рудик М.А. – магістрант кафедри теплової та альтернативної енергетики Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Рукавішников П.В. – старший викладач кафедри теплотехніки, теплових двигунів та енергетичного менеджменту Українського державного університету залізничного транспорту

Сабанюк А.Ю. – здобувачка вищої освіти за спеціальністю «Інформаційні системи та технології» Навчально-наукового інституту кібернетики, інформаційних технологій та інженерії Національного університету водного господарства та природокористування

Савіцький Р.С. – аспірант, старший викладач кафедри інженерії програмного забезпечення Державного університету «Житомирська політехніка»

Сайчук О.В. – доктор технічних наук, професор кафедри механічної та електричної інженерії Полтавського державного аграрного університету

Салівон Д.В. – бакалаврант 4 курсу кафедри автоматизації енергетичних процесів Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Сангінова О.В. – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри технології неорганічних речовин, водоочищення та загальної хімічної технології Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Семенов А.Д. – магістрант 2 курсу кафедри автоматизації енергетичних процесів Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Скибінський А.С. – студент кафедри комп'ютерних технологій дизайну і графіки факультету наземних споруд і аеродромів Національного авіаційного університету

Слабінога М.О. – кандидат технічних наук, доцент кафедри комп'ютерних систем і мереж Івано-Франківського національного технічного університету нафти і газу

Смірнов О.М. – доктор технічних наук, професор, Фізико-технологічний інститут металів та сплавів Національної академії наук України

Сокульський О.Є. – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри інформаційних систем та технологій Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Стельмах Н.В. – кандидат технічних наук, доцент кафедри комп'ютерно-інтегрованих технологій виробництва приладів Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Степанченко А.А. – студент кафедри теплової та альтернативної енергетики Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Стешенко Я.В. – аспірант кафедри автоматизації та систем неруйнівного контролю Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Сушин І.О. – аспірант 3 курсу групи ТЗ-11ф кафедри телекомунікацій Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Тесленко А.В. – магістрант кафедри інженерії вагонів та якості продукції Українського державного університету залізничного транспорту

Тіменко А.В. – старший викладач кафедри комп'ютерних систем та мереж Національного університету «Запорізька політехніка»

Толстопалова Н.М. – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри технології неорганічних речовин, водоочищення та загальної хімічної технології Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Топольськов Є.О. – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри інформаційних систем і технологій Національного транспортного університету

Трембус І.В. – кандидат технічних наук, доцент кафедри екології та технології рослинних полімерів Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Тройніна А.С. – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри інженерії програмного забезпечення Національного університету «Одеська політехніка»

Ушкаренко О.О. – доктор технічних наук, професор, професор кафедри програмованої електроніки, електротехніки і телекомунікацій Національного університету кораблебудування імені адмірала Макарова

Фант М.О. – кандидат філологічних наук, доцент кафедри інженерії програмного забезпечення Державного університету «Житомирська політехніка»

Федоров Д.Д. – бакалаврант 4 курсу кафедри автоматизації енергетичних процесів Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Чернишова О.О. – аналітик Euromonitor International

Черноусенко О.Ю. – доктор технічних наук, професор, завідувачка кафедри теплової та альтернативної енергетики Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Шевченко В.В. – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри комп'ютерно-інтегрованих технологій виробництва приладів Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Шелухін С.В. – кандидат технічних наук, старший науковий співробітник, професор кафедри, Військова академія (м. Одеса)

Шкрябець В.І. – магістрант кафедри комп'ютерних систем та мереж Національного університету «Запорізька політехніка»

Шпак Н.Г. – кандидат економічних наук, доцент, доцент кафедри експлуатації портів і технологій вантажних робіт Одеського національного морського університету

Шумило О.М. – кандидат технічних наук, доцент, професор кафедри «Суднові енергетичні установки та технічні експлуатація» Одеського національного морського університету

Юр'єв О.В. – аспірант Державного університету інфраструктури та технологій

Науковий журнал

**ВЧЕНІ ЗАПИСКИ
ТАВРІЙСЬКОГО НАЦІОНАЛЬНОГО УНІВЕРСИТЕТУ
ІМЕНІ В.І. ВЕРНАДСЬКОГО**

Серія: Технічні науки

Том 35 (74) № 2 2024

Коректура • *Н. Славогородська*

Комп'ютерна верстка • *Н. Кузнєцова*

Адреса редакції:

Таврійський національний університет імені В.І. Вернадського

м. Київ, вул. Джона Маккейна, 33

Електронна пошта: editor@tech.vernadskyjournals.in.ua

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

Формат 60×84/8. Гарнітура Times New Roman.

Папір офсетний. Цифровий друк. Обл.-вид. арк. 31,48. Ум. друк. арк. 44,64. Зам. № 0524/324

Підписано до друку 24.05.2024. Наклад 150 прим.

Видавництво і друкарня – Видавничий дім «Гельветика»

65101, м. Одеса, вул. Інглезі, 6/1

Телефони: +38 (095) 934 48 28, +38 (097) 723 06 08

Е-mail: mailbox@helvetica.ua

Свідоцтво суб'єкта видавничої справи

ДК № 7623 від 22.06.2022 р.